

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

На правах рукописи

БАКИРОВ Сергей Мударисович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН
КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ ОБОСНОВАНИЕМ СПОСОБОВ
И СРЕДСТВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Специальность

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научные консультанты:

Доктор технических наук, профессор

Ерошенко Геннадий Петрович

Доктор технических наук, доцент

Соловьев Дмитрий Александрович

Саратов 2021

Оглавление

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ОРОШЕНИЯ | 12 |
| 1.1 Перспективы развития дождевальной техники | 12 |
| 1.2 Анализ эксплуатационных характеристик дождевальных машин кругового действия..... | 20 |
| 1.3 Анализ энергопотребления дождевальных машин кругового действия с различными системами энергоснабжения..... | 33 |
| 1.4 Оценка структуры энергопотребления искусственного орошения дождевальными машинами | 42 |
| 1.5 Анализ научных достижений в области ресурсо- и энергосбережения искусственного орошения эксплуатации дождевальных машин кругового действия..... | 45 |
| 1.6 Постановка научной проблемы и задач исследования..... | 56 |
| 2 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ | 60 |
| 2.1 Обоснование цели и границ изучаемой системы..... | 60 |
| 2.2 Разработка классификации учитываемых факторов | 67 |
| 2.3 Экономические аспекты цели исследования..... | 72 |
| 2.4 Обоснование эффективности энергоснабжения дождевальной машины кругового действия | 74 |
| 2.5 Синтез структуры системы энергоснабжения дождевальных машин..... | 83 |
| 2.5.1 Обоснование исходных данных | 83 |
| 2.5.2 Функциональный анализ систем энергоснабжения | 94 |
| 2.6 Выводы по главе..... | 128 |
| 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ | 130 |
| 3.1 Обоснование параметров для оптимизации системы энергоснабжения... | 130 |
| 3.2 Обоснование функции обобщающего критерия эффективности системы энергоснабжения | 151 |

| | |
|---|-----|
| 3.3 Дискретный выбор системы энергоснабжения..... | 161 |
| 3.4 Выводы по главе..... | 181 |
| 4 СПОСОБЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ | 183 |
| 4.1 Обоснование параметров электропривода опорных тележек секций электрифицированной дождевальной машины кругового действия..... | 183 |
| 4.2 Оценка изменения энергопотребления электропривода за счет изменения конструктивных параметров дождевальной машины..... | 189 |
| 4.3 Обоснование аккумуляторного источника питания дождевальной машины кругового действия | 230 |
| 4.4 Оценка энергетической эффективности применения бустерного насоса с электроприводом крайней секции дождевальной машины | 251 |
| 4.5 Разработка технических средств повышения энергетической эффективности..... | 262 |
| 4.5.1 Разработка устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей | 263 |
| 4.5.2 Разработка систем управления дождевальной машины | 273 |
| 4.5.3 Разработка устройства пространственного положения секции дождевальной машины | 285 |
| 4.6 Выводы по главе..... | 291 |
| 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И УСТРОЙСТВА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ | 292 |
| 5.1 Экспериментальные исследования аккумуляторного источника питания дождевальных машин кругового действия..... | 292 |
| 5.2 Экспериментальные исследования динамической компенсации реактивной мощности | 306 |
| 5.3 Выводы по главе..... | 320 |
| 6 ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВНЕДРЕНИЯ | 321 |
| 6.1 Производственные испытания и внедрение алгоритма и программы поиска оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин | 321 |

| | |
|---|-----|
| 6.2 Результаты экспертных оценок показателей системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия..... | 326 |
| 6.3 Обработка результатов производственных испытаний по выбору системы энергоснабжения дождевальных машин | 333 |
| 6.4 Производственные испытания дождевальных машин на аккумуляторном питании с использованием возобновляемых источников энергии | 337 |
| 6.5 Производственные испытания дождевальной машины с изменением конструктивных параметров..... | 340 |
| 6.6 Техничко-экономическая оценка результатов внедрения | 345 |
| 6.6.1 Оценка экономической эффективности применения энергоэффективной системы эксплуатации дождевальной машины кругового действия | 345 |
| 6.6.2 Техничко-экономическая оценка внедрения аккумуляторного источника питания с использованием солнечных батарей | 350 |
| 6.7 Выводы по главе..... | 365 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 367 |
| РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ | 370 |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ | 370 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 371 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 407 |
| <i>Приложение А</i> | 408 |
| <i>Приложение Б</i> | 417 |
| <i>Приложение В</i> | 422 |
| <i>Приложение Г</i> | 423 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Орошаемое земледелие обеспечивает 2–6-кратное увеличение урожайности традиционных культур и возможность выращивания растений с повышенными требованиями к агрономическим условиям. Однако орошаемое земледелие связано с большим потреблением разнообразных ресурсов (трудовых, водных, энергетических). Особенно велико энергопотребление при орошении дождеванием.

Дождевальные машины (ДМ) имеют разнообразные технологические характеристики. При возделывании пахотных земель эффективность широкозахватных ДМ кругового действия относительно других средств орошения составляет 62 %, из которых на долю электрифицированных машин приходится 52 %.

Энергетическая эффективность полива культурных растений дождеванием пропорциональна размерам поливной площади и расстоянию, на которое необходимо транспортировать поливную воду. Анализ энергопотребления показал, что полив дождеванием условно можно разделить на водоподачу и водораспределение. На водоподачу от водоема до дождевальной машины энергопотребление имеет устойчивый характер развития и включено в тариф на 1 м³ воды. Энергопотребление на водораспределение по охватываемой площади относится к эксплуатационным издержкам, которые существенно отличаются друг от друга в зависимости от варианта энергоснабжения дождевальных машин. В одинаковых природно-климатических зонах используют, например, до 40 вариантов энергоснабжения: электрическое централизованное и автономное энергоснабжение от дизельных, бензиновых и аккумуляторных установок генерации энергии, от гидравлических, электрических и механических приводов и т. п. Анализ показал, что энергопотребление по вариантам энергоснабжения различается в 1,5–4,2 раза.

Причиной завышенного потребления энергии ДМ является отсутствие практических рекомендаций и принципов выбора оптимального варианта энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации дождевальной машины. В одинаковых условиях эксплуатируют ДМ с различными системами энергоснабжения. Для решения этих вопросов предлагают частные заключения по критерию минимума

расхода воды или энергии. Такие подходы не обеспечивают существенного повышения энергетической эффективности. Таким образом, проблема поиска условий наименьшего потребления энергии дождевальными машинами является актуальной и недостаточно изученной.

Основанием для данной работы, являющейся продолжением комплекса работ по созданию, совершенствованию и эксплуатации электрифицированных дождевальных машин кругового действия, являются:

- государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 годы (утв. 20 декабря 2012 г., № 2433-р);
- федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (утв. 21 мая 2013 г., № 426);
- государственная программа Саратовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области на 2014–2020 годы», подпрограмма «Техническая и технологическая модернизация, научно-инновационное развитие на 2014–2020 годы» (утв. 2 октября 2013 г., № 520-П);
- приоритетное научное направление ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795).

Степень разработанности темы. Разработка дождевальных машин включала в себя ряд этапов. На первых из них основное внимание было уделено обеспечению выполнения таких функций, как подведение и распределение воды на поливном участке. Затем стали разрабатывать темы по улучшению качества функционирования ДМ. В последнее время в исследованиях И.Г. Стрижкова, В.Н. Карпова, З.Ш. Юлдашева, В.Г. Сазыкина, В.И. Чарыкова, Д.А. Соловьева и др. на первый план были выдвинуты проблемы экономии энергетических ресурсов. Смежными вопросами энергосбережения и эксплуатации электроприводов занимались Г.П. Ерошенко, М.А. Таранов, С.В. Оськин, Н.П. Кондратьева, С.К. Шерьязов, В.Г. Петько, А.В. Линенко и др. Определены не только методические вопросы оценки уровня энергоэффективности, но и технические направления

достижения этого уровня. Однако, несмотря на глубину разработки тем, задача повышения энергетической эффективности при эксплуатации дождевальных машин кругового действия остается актуальной. Противоречие состоит в том, что номенклатура выпускаемых ДМ и перечень предоставляемых производителем и определяющих свойства изделий технических характеристик позволяет потребителю выбирать и эксплуатировать энергооборудование и решать задачи искусственного орошения при возделывании зернобобовых, кормовых культур, однако улучшению энергоэффективности систем и достижению максимальной результативности использования ресурсов препятствует отсутствие обобщенной совокупности научно обоснованных критериев, позволяющей при сравнении и выборе оборудования в комплексе учесть географические, природно-климатические, технические, технологические, эксплуатационные требования, показатели, характеристики объектов и изделий и добиться повышения энергоэффективности при эксплуатации ДМ кругового действия.

Цель работы – снизить энергопотребление дождевальных машин кругового действия за счет обоснования выбора оптимальной системы энергоснабжения, совершенствования способов и средств энергосбережения.

Задачи исследований:

1. Выполнить анализ номенклатуры, характеристик и условий эксплуатации дождевальных машин кругового действия и определить подходы к улучшению показателей энергоэффективности для достижения энергосбережения в технологиях искусственного орошения.

2. Исследовать факторы, влияющие на энергопотребление полива дождевальными машинами кругового действия и синтезировать функционально-структурные модели их энергоснабжения.

3. Установить зависимость эффективности энергоснабжения дождевальной машины от условий эксплуатации, разработать обобщающий критерий и алгоритм определения оптимального энергоснабжения, а также обосновать границы, зоны и условия применения различных вариантов энергоснабжения.

4. Разработать способы и технические средства повышения энергетической эффективности электрифицированных дождевальных машин кругового действия.

5. Провести экспериментальные исследования рабочих процессов аккумуляторного источника питания и оценить влияние значимых факторов на продолжительность движения дождевальной машины, а также разработать и исследовать устройство динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей с источником питания дождевальных машин на переменном токе.

6. Выполнить полевые испытания, производственную проверку полученных результатов исследования и оценить их экономическую эффективность.

Объект исследования – система энергоснабжения дождевальной машины кругового действия, включающая в себя источник энергии, приемник энергии и сети питания и управления.

Предмет исследования – закономерности изменения энергопотребления дождевальных машин кругового действия в различных условиях эксплуатации.

Научную новизну работы представляют:

- структурно-функциональные модели и составляющие эффективности системы электрического привода опорных тележек дождевальных машин;
- обобщающий критерий эффективности системы энергоснабжения, позволяющий сравнивать различные типы привода опорных тележек эксплуатируемых дождевальных машин с учетом технологических, технико-экономических, природно-климатических условий;
- теоретически обоснованная взаимосвязь условий эксплуатации с параметрами системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия;
- алгоритм и программа выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия для конкретных условий эксплуатации;
- модифицированные математические модели зависимости нагрузки электропривода от изменения диаметра водораспределительного трубопровода и параметров движителя опорных тележек дождевальных машин кругового действия;
- зависимость продолжительности движения дождевальной машины от параметров аккумуляторного источника питания электропривода;
- технические средства, позволяющие повысить энергоэффективность электрифицированных дождевальных машин (автономная электрифицированная секция дождевальной машины кругового действия, устройство динамической компенсации

реактивной мощности электродвигателей, схемы управления дождевальными машинами кругового действия и устройство определения угла поворота секции).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в расширении и дополнении знаний по эксплуатации дождевальных машин, а именно в разработке теоретических положений дискретного выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия для конкретных условий эксплуатации на основе обобщающего критерия эффективности, позволяющих повысить энергетическую эффективность полива;
- в совершенствовании математических моделей изменения энергопотребления при использовании средств энергосбережения, которые могут быть использованы при разработке новых электрифицированных дождевальных машин кругового действия;
- в практическом применении научных разработок и результатов исследования в производстве на предприятиях АПК Саратовской, Волгоградской областей и Чеченской Республики, при изготовлении дождевальных машин кругового действия МДЭК «КАСКАД», а также в учебном процессе образовательных заведений всех форм собственности при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по вопросам эксплуатации дождевальных машин.

Методология и методы исследований. Методология исследования основана на поэтапном решении проблемы поиска оптимального энергоснабжения для существующих условий эксплуатации дождевальных машин кругового действия по критерию наименьшего энергопотребления. Исследования проводили с использованием теории эксплуатации электрооборудования с применением программ MS Excel 2010, Statistica v.10. Моделирование схем и устройств выполнено с помощью программ КОМПАС 3D V16 и Multisim v. 8.2.

При определении проблемы использованы эмпирические методы исследования: изучение, наблюдение, измерение и сравнение, а при решении проблемы – системный подход, анализ, синтез, эксперимент, статистические методы обработки данных и обобщение.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

1. Структурно-функциональные модели систем энергоснабжения дождевальных машин, определяемых показателями составляющих эффективности их приводов: гидравлического $k_{орг} = 0,22$; механического $k_{орг} = 0,21$; электрического $k_{орг} = 0,26...0,31$.

2. Математическая модель эффективности энергоснабжения, учитывающая обобщающий критерий эффективности k_1 , показатель мощности k_2 , показатель КПД k_3 , показатель стоимости k_4 , показатель надежности k_5 , показатель массы k_7 , поливную норму z_1 , площадь поливного участка z_2 , давление потока жидкости на входе z_4 , удаленность от централизованного энергоснабжения z_5 и водоема z_6 , прирост прибыли z_7 .

3. Установленные зоны, границы и условия применения оптимальных систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия при различных условиях эксплуатации.

4. Полученные аналитические зависимости нагрузки электропривода опорных тележек от ступенчатого снижения диаметра водораспределительного трубопровода секции, а также от посекционного снижения диаметра для всей дождевальной машины.

5. Установленные аналитические зависимости продолжительности движения опорной тележки секции от параметров аккумуляторного источника питания, оснащенного возобновляемыми источниками энергии, и полученные результаты экспериментальных исследований аккумуляторного источника питания.

6. Разработанные устройства динамической компенсации реактивной мощности и определения угла поворота; схемы управления дождевальной машиной, позволяющие снизить ее энергопотребление; результаты экспериментальных исследований устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей с источником питания дождевальных машин на переменном токе.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена данными экспериментальных исследований по снижению энергопотребления при эксплуатации дождевальных машин кругового действия и обеспечена применением методик испытаний в соответствии с требова-

ниями ГОСТов, с использованием сертифицированных приборов и оборудования, а также достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных и их подтверждением при лабораторных, стендовых и полевых испытаниях.

Работа проведена в рамках приоритетного научного направления «Ресурсосберегающее экологически безопасное земледелие» (рег. № 01201151791) ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». Апробация стендов и промышленных образцов выполнена в учебно-научно-производственном объединении «Поволжье» и учебно-научно-производственном комплексе «Агроцентр» при ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ».

Основные положения работы представлены и обсуждены на национальных научно-практических конференциях с международным участием «Актуальные проблемы энергетики» (г. Саратов, 2017–2020 гг.); конференциях ППС кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» (г. Саратов, 2015–2020 гг.); национальном научно-техническом семинаре имени В.В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (г. Саратов, 2019 г.); международном научно-практическом семинаре «Мелиорация в процессе климатических изменений» (г. Комарно, Словакия, 2019 г.); на научно-техническом совете Министерства сельского хозяйства Саратовской области (г. Саратов, 2020 г.).

Основные положения диссертации отражены в 52 работах, в том числе в 15 статьях в рецензируемых научных журналах, 7 статьях в изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus, 4 патентах на изобретения и полезные модели. Общий объем публикаций составляет 27,6 печ. л., из которых 12,9 печ. л. принадлежат лично соискателю.

Диссертация обобщает результаты научных исследований и практических разработок автора в период с 2011 по 2021 г. и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 361 наименований, 36 из которых на иностранном языке, и 4 приложений. Материал работы изложен на 406 страницах машинописного текста, включает в себя 169 рисунков и 74 таблицы.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ОРОШЕНИЯ

1.1 Перспективы развития дождевальной техники

На Всероссийском форуме сельхозпроизводителей (март 2018 г., г. Краснодар) были отмечены важные направления развития сельского хозяйства страны. Россия, имея самую большую площадь сельскохозяйственных земель, может стать крупнейшим экспортером продовольствия в мире. Проведенный анализ позволяет предположить, что до 2022 г. доля экспорта превысит долю ввозимого в страну продовольствия. При этом развитие растениеводства в большей части будет ориентировано на получение высококачественных кормов и кормовых добавок [24, 36, 76, 217, 225].

Рост интереса к российскому продовольствию вызван повышением конкурентоспособности товаров. В 2018 г. Россия занимала первое место в мире по экспорту пшеницы и второе место по экспорту других зерновых. По другим культурам (кукуруза, соя, нут и др.) РФ входит в десятку крупнейших производителей (таблица 1.1) [49, 76, 225].

Таблица 1.1 – Производство культур в РФ

| Культура | Объем, млн т | | | |
|-----------------|--------------|---------|---------|---------|
| | 2005 г. | 2010 г. | 2014 г. | 2018 г. |
| Яровая пшеница | 21,41 | 8,04 | 28,23 | 42,13 |
| Озимая пшеница | 24,60 | 13,9 | 27,17 | 57,65 |
| Кукуруза | 3,11 | 2,67 | 11,45 | 13,72 |
| Подсолнечник | 3,43 | 5,89 | 8,53 | 12,99 |
| Сахарная свекла | 28,76 | 11,14 | 33,56 | 52,11 |
| Картофель | 42,81 | 25,35 | 32,89 | 31,04 |
| Чечевица | 0,08 | 0,04 | 0,08 | 0,07 |
| Нут | 0,05 | 0,01 | 0,07 | 0,06 |

Тенденция роста возделывания культур формируется за счет увеличения спроса на внутреннем и внешнем рынках. В перспективе в 2024 г. планируется

выйти на лидирующие позиции поставки рапса и других культур в Китай [217]. Спрос на нетрадиционные культуры (для земель РФ это, например, рапс, соя) ориентирует крупные корпорации, средние и малые предприятия на их выращивание.

По данным различных регионов РФ [36, 77, 76, 95, 129, 184], основная доля выращивания традиционных культур приходится на Южный федеральный округ и Поволжье (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – **Возделывание культурных растений по субъектам РФ, млн т (2018 г.)**

| Наименование субъекта РФ | Пшеница | Подсолнечник | Кукуруза | Ячмень |
|--------------------------|---------|--------------|----------|--------|
| Саратовская область | 2,45 | 1,61 | 0,43 | 0,65 |
| Волгоградская область | 2,88 | 0,98 | 0,42 | 0,67 |
| Ставропольский край | 7,22 | 0,55 | 0,68 | 0,71 |
| Краснодарский край | 8,91 | 0,97 | 1,91 | 0,85 |
| Ростовская область | 9,42 | 1,37 | 0,53 | 0,68 |
| Воронежская область | 2,73 | 1,15 | 0,89 | 0,93 |
| Пензенская область | 1,44 | 0,28 | 0,33 | 0,52 |
| Самарская область | 1,81 | 1,00 | 0,39 | 0,64 |
| Ульяновская область | 0,86 | 0,16 | 0,20 | 0,51 |

Как видно из таблицы 1.2, в лидирующих сельскохозяйственных округах выращивают традиционные культуры, разнообразие сортов которых позволяет возделывать их в самых тяжелых условиях – от засушливых до затапливаемых территорий. В настоящее время государством поставлена задача селекции, генетики, разработки технологий и средств возделывания высокобелковых культур, таких, как соя, горох, фасоль, нут, чечевица, люцерна, поскольку производство высококачественных кормов для животноводства основано на белковых культурах [36, 48, 67, 71, 173, 187, 208, 231, 260, 358].

Анализ производства высокобелковых культур показал, что на их возделывание влияет множество факторов (таблица 1.3), в первую очередь резкие перепады влажности почвы [36, 48, 71, 219, 224, 226, 261, 262].

Большое значение в повышении эффективности пахотных земель занимает орошение, а именно полив дождеванием. Из всех способов полива оно является самым перспективным для выращивания культурных растений в большом количестве.

Применение дождевальной техники, в отличие от капельного полива, который предусматривает стационарное расположение трубопроводов на поверхности или в грунте, имеет один существенный недостаток – исключение возможности работы сельскохозяйственной техники на этапах культивирования, посева, обработки и сбора урожая. Несмотря на ресурсосберегающий эффект, капельный полив используют только в защищенном грунте [176, 185, 255, 309, 340, 355, 359].

Таблица 1.3 – Влияние отдельных мероприятий агромелиоративного комплекса на урожайность

| Агромелиоративное мероприятие | Доля в урожайности, % | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|----------------|----------|-----|---------|-----|
| | яровая пшеница | озимая пшеница | кукуруза | соя | люцерна | нут |
| Без полива | 40 | 52 | 20 | 2 | 30 | 23 |
| С поливом | 38 | 26 | 53 | 61 | 46 | 42 |
| Внесение удобрений | 12 | 12 | 14 | 11 | 15 | 20 |
| Опрыскивание | 8 | 9 | 5 | 6 | 8 | 9 |
| Увеличение нормы высева | 5 | 6 | 7 | 7 | 6 | 6 |

Анализируя различные источники [5, 59, 185, 188, 215, 255, 309, 326, 339, 355, 358, 359], следует отметить, что полив дает несколько эффектов. Ощутимым и важным результатом является прибавка урожая в среднем в 1,3–6,2 раза в зависимости от культуры. Однако развитие технологий возделывания, генетики и селекции для отдельных видов культур (например, яровой и озимой пшеницы) позволяет получать семена, устойчивые к резким перепадам влажности почвы. Это обеспечивает хорошие урожаи в засушливых зонах (Астраханская, Волгоградская, Ростовская, Саратовская области). Полив таких культур в засушливые периоды [359, 188, 262, 323] производят по необходимости. Культуры, чувствительные к влажности почвы (кукуруза, соя, люцерна и другие высокобелковые культуры), формируют хорошие урожаи только с поливом.

Следующим важным эффектом полива является возможность выращивания высокобелковых культур, которые требуют высокой оросительной нормы. Например, в Саратовской, Самарской, Волгоградской областях сою без полива не выращивают, так как урожай не оправдывает затраченные средства на возделывание культуры. С поливом же в данных регионах сою можно собрать до 10-40 ц/га. Такое же положение с другими культурами (см. таблицу 1.3) Таким образом, для

производителей сельскохозяйственных культур полив открывает возможность возделывания новых высокобелковых растений.

Частота и режим полива определяются совокупностью действий многих факторов: вида культур, периода роста, вида почвы, климатической зоны, уровня естественных влагозапасов после зимы, количества осадков (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – **Нормы влажности почвы (чернозем) и полива**

| Вид культуры | Наименьшая влагоемкость грунта (НВ, %) | | Средняя оросительная норма $m_{он}$, м ³ /га |
|-----------------|--|--------------------------|--|
| | для незасоленных почв | для слабозасоленных почв | |
| Зерновые | 60 | 70 | 2500...3000 |
| Кукуруза | 65 | 80 | 4000...6000 |
| Корнеплоды | 65 | 75 | 3000...4000 |
| Подсолнечник | 60 | 70 | 3000...3500 |
| Люцерна | 70 | 80 | 5000...6000 |
| Соя | 70 | 85 | 6000...7000 |
| Плодово-ягодные | 65 | 85 | 5000...6000 |

Третьим и самым важным с точки зрения сельского хозяйства эффектом полива является сохранение плодородия почвы. Помимо прямого прироста урожая в почве при поливе улучшаются химические реакции, активируются процессы образования гумусного слоя. С поливом засушливых, сухих и очень сухих земель сохраняется перспектива возделывания культурных растений. Как показывают исследования Министерства природных ресурсов и экологии, Департамента мелиорации Министерства сельского хозяйства РФ, государственной службы Украины по вопросам геодезии, картографии и кадастра, Министерства аграрной политики и продовольствия Украины и других учреждений, за несколько десятков лет с изменением климата земель [9, 36, 58, 165, 200, 304, 308, 313, 353] площадь засушливых и сухих земель увеличивается (рисунок 1.1).

По данным [9, 36, 58, 165, 200, 308, 313, 353], площадь сухих и очень сухих земель, нуждающихся в орошении, за последние 50 лет выросла на 14 %.

Сложившаяся ситуация вызывает необходимость повсеместного возрождения мелиорации. Водный баланс на территориях Центрального, Южного и Приволжского федеральных округов изменяется в худшую сторону. Спасти положение можно восстановлением, разработкой и строительством оросительных комплексов.

В настоящее время в Саратовской области наблюдается рост орошаемой площади. Это связано со многими факторами. Толчком развития мелиорации стало действие программ Министерства сельского хозяйства РФ и Саратовской области «Развитие мелиоративного комплекса России», подпрограммы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Саратовской области», а также государственной программы «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области» и аналогичных программ других регионов [106, 221, 222, 291]. Этими документами предусмотрено возмещение части (до 70 %) затрат фермеров и сельскохозяйственных предприятий на приобретение и строительство оросительных систем.

Площадь поливных земель в различных регионах РФ зависит от климатической зоны (рисунок 1.2). В настоящее время в Саратовской области наблюдается рост площади орошаемых земель сельскохозяйственного назначения (рисунок 1.3).

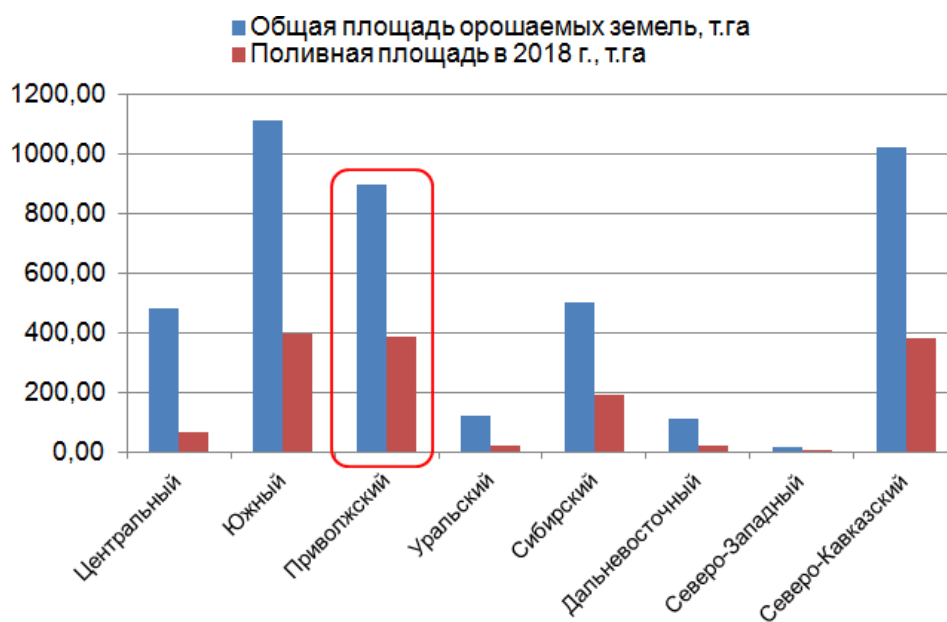


Рисунок 1.2 – Площадь орошаемых земель в России по округам

Как отмечалось ранее, из всех способов полива (поверхностного, дождевания и капельного) самым распространенным является полив дождеванием. Дождевальная техника активно развивается и прошла путь от простых разбрызгивателей до широкозахватных дождевальных машин. По разным данным [2, 15, 105, 145, 177, 180, 231, 268, 308, 309, 326, 332, 336, 340, 347], в настоящее время в мире используют около 200 тыс. ед. единиц различной дождевальной техники, в том числе в РФ около 15 тыс. ед. (рисунок 1.4).

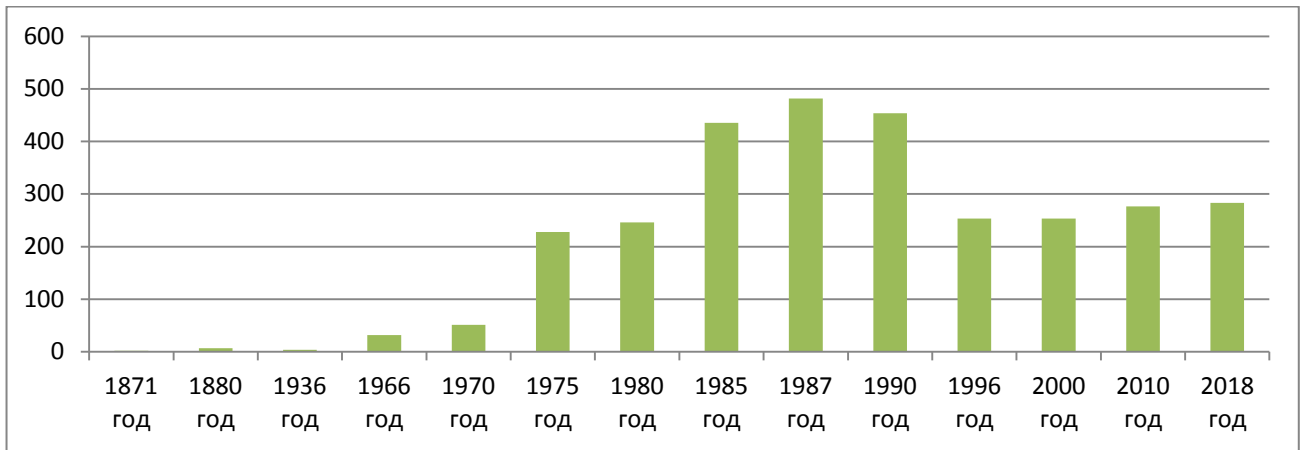


Рисунок 1.3 – Площадь орошаемых земель Саратовской области

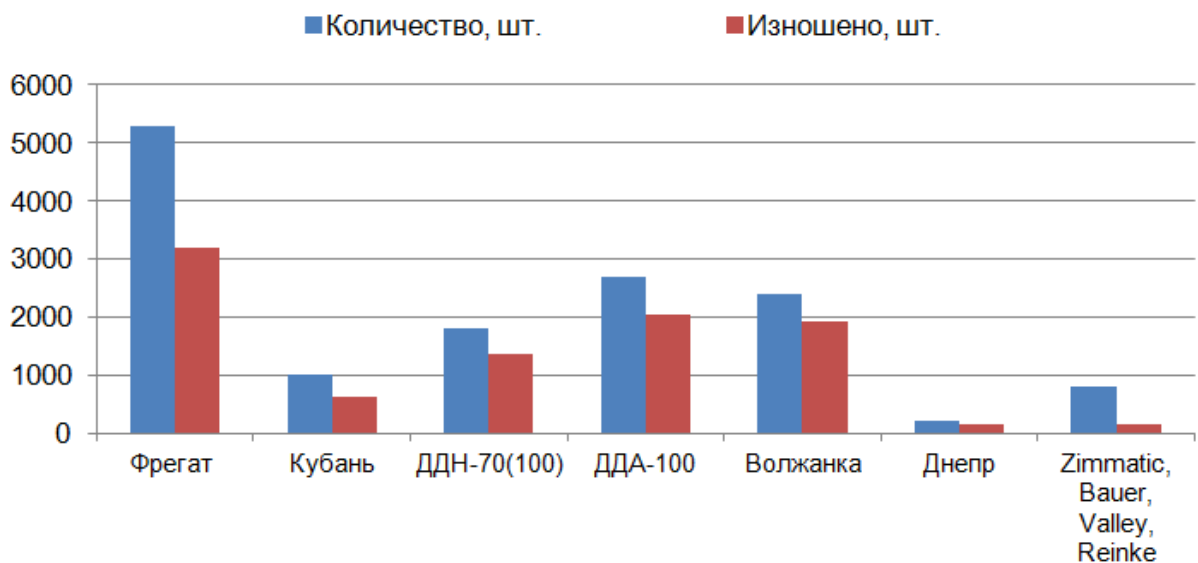


Рисунок 1.4 – Виды дождевальной техники в РФ

В истории развития мелиорации и дождевальной техники значительную роль сыграл завод «Фрегат» (год основания – 1969, Украина) [268], который выпустил около 50 тыс. ед. различной дождевальной техники. Также можно отметить ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» [59, 304, 309], на базе которого изготовлена дождевальная машина «Волжанка-64» и усовершенствована конструкция ДМ «Фрегат».

Потребность в дождевальной технике в настоящее время высока. Как показывают исследования последних лет [36, 65, 95, 126, 185, 293, 294, 309, 321], вырос спрос на электрифицированные дождевальные машины. Это объясняется тем, что благодаря современным техническим средствам, которые работают на электроэнергии, появилась возможность дистанционного контроля и управления дождевальными машинами и, соответственно, поливом.

Таким образом, анализ сложившегося положения в мелиорации и направления стратегического развития страны показывает, что в ближайшие 5 лет (до 2024 г.) будут наращиваться темпы сельскохозяйственного производства в растениеводстве, расширяться список возделывания нетрадиционных дорогостоящих культур. Установлен ориентир на выращивание высокобелковых культур для дальнейшего производства высококачественных кормов для животноводства. Вместе с этим возрастает потребность в орошении и, как следствие, в дождевальных машинах (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Анализ потребности земель в дождевальных машинах

| Субъект РФ | Площадь, орошаемых земель, тыс. га (2019 г.) | Планируемая площадь орошаемых земель, тыс. га (2024 г.) | Площадь, охватываемая дождевальными машинами, тыс. га | Потребность в дождевальных машинах, ед. |
|---------------------|--|---|---|---|
| Саратовская обл. | 257,7 | 310,0 | 174,1 | 348 |
| Волгоградская обл. | 52,8 | 152,8 | 38,2 | 61 |
| Ростовская обл. | 228,9 | 259,0 | 69,9 | 663 |
| Краснодарский край | 461,3 | 500,0 | 399,1 | 259 |
| Ставропольский край | 242,1 | 320,0 | 64,2 | 741 |
| Пензенская обл. | 59,1 | 70,0 | 26,2 | 137 |
| Воронежская обл. | 75,9 | 175,0 | 9,9 | 275 |
| ИТОГО | 1377,8 | 1786,8 | 781,6 | 2484 |

В условиях неизбежного климатического изменения и увеличения площади сухих и очень сухих земель важность мелиорации возрастает и будет расти в будущем. Вместе с этим стремление сельскохозяйственных производителей получать стабильный и качественный урожай создает благоприятную перспективу развития дождевальной техники.

Оценка запасов водных ресурсов свидетельствует о необходимости бережного и экономичного расходования воды на полив, создания систем орошения с высоким коэффициентом полезного действия (КПД). В связи с отсутствием возможности совместного использования систем капельного полива и сельскохозяйственной техники (тракторов, комбайнов и т. п.) возрастает роль разработок эффективных дождевальных машин, потребность в которых для РФ составляет около 2500 ед. на период до 2025 г.

1.2 Анализ эксплуатационных характеристик дождевальных машин кругового действия

Дождевальные установки и машины различаются по конструкции и типу энергоснабжения.

Несколько десятков лет назад дождевальные машины 1-го и 2-го поколений существенно различались по мелиоративным признакам, а также по типу перемещения и управления [48, 72, 104, 139, 142, 172, 183, 261, 262, 263]. В настоящее время выпускаемые машины нового поколения имеют множество модификаций по принципу управления, движения, конструкции и т. п. [2, 36, 65, 102, 105, 122, 126, 137, 145, 147–152, 160, 162, 178, 180, 183, 185, 187, 188, 200, 231, 233, 235, 239, 248, 254, 256, 259, 263, 268, 288, 293, 294, 309, 320]. Встречаются все виды дождевальных машин и установок. В таблице 1.6 представлена классификация дождевальных машин, где самыми распространенными (на их долю приходится 62,9 %) являются ДМ кругового действия [172, 178, 183, 323].

В настоящее время на сельскохозяйственных предприятиях применяют короткоструйные ДМ. Это связано с эффективностью полива и совместным внедрением мероприятий по энерго- и ресурсосбережению, а также с оптимизацией режимов работы насосных станций. В средне- и дальнеструйных машинах и установках требуется создание высокого давления на входе в водоподводящий трубопровод, что приводит к значительным потерям энергии [344, 15, 254, 36, 48, 65, 122, 125, 126, 139, 141, 142, 144, 145, 180, 178, 210, 212, 216, 219, 231, 234–236, 239, 240, 256, 257, 259, 261, 263, 293, 294, 320, 321].

Среди короткоструйных и низконапорных машин большинство (52 %) имеют электрический привод и управление (см. отмеченные строки таблицы 1.6).

Доля дождевальных машин кругового действия (ДМКД) растет относительно общего количества дождевальных установок. В первую очередь это связано с тем, что к неподвижной опоре, относительно которой выполняется движение по кругу, можно стационарно подвести водопровод и источник энергии [27, 34, 36, 104, 105, 137, 147–152, 178, 210–213, 231, 233, 239, 256, 294, 309].

Таблица 1.6 – Классификация дождевальных машин и установок

| Тип | Характер работы | Группа | | | Марка | Производитель | Тип привода |
|------------------|------------------------|-------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|---------------|----------------|
| | | перемещение | характер подачи дождя | оросительная сеть | | | |
| Коротко-струйные | фронтально-го действия | самоходом | прерывистый | открытая | ДДА-100 МА ДДА-100М | Россия | механический |
| | фронтально-го действия | самоходом | прерывистый | открытая | «Кубань» | Россия | электрический |
| | кругового действия | самоходом | прерывистый | закрытая | «Кубань-ЛК» | Россия | электрический |
| | кругового действия | самоходом | непрерывный | закрытая | «Каскад» | Россия | электрический |
| | кругового действия | самоходом | непрерывный | закрытая | Bauer | Австрия | электрический |
| | кругового действия | самоходом | непрерывный | закрытая | Zimmatic | США | электрический |
| | кругового действия | самоходом | непрерывный | закрытая | ДМЭ «Фрегат» | Украина | электрический |
| Средне-струйные | кругового действия | самоходом | прерывистый | закрытая | ДМ «Фрегат» | Украина | гидравлический |
| | позиционно-го действия | самоходом | непрерывный | закрытая | «Волжанка» | Россия | гидравлический |
| | позиционно-го действия | самоходом | непрерывный | закрытая | «Днепр» ДФ-120 | Украина | гидравлический |
| Дальне-струйные | позиционно-го действия | самоходом | прерывистый | открытая | ДДН-70 ДДН-100 | Россия | механический |

Примечание. В настоящее время число производителей широкозахватных дождевальных машин кругового и фронтального действия существенно больше, чем указано в таблице.

По сравнению с дождевальными машинами фронтального действия (ДМФД) ДМ кругового действия (ДМКД) имеют ряд других преимуществ (рисунок 1.5):

- упрощенное автоматическое управление;
- меньшее количество операций при настройке и наладке;
- отсутствие износа подводящего трубопровода;
- возможность стационарного подведения дополнительного источника питания;
- меньшие удельные трудозатраты на обслуживание и ремонт ДМ;
- быстроедействие и оперативность отключения при аварийных случаях;
- меньшая материалоемкость на поливную площадь.

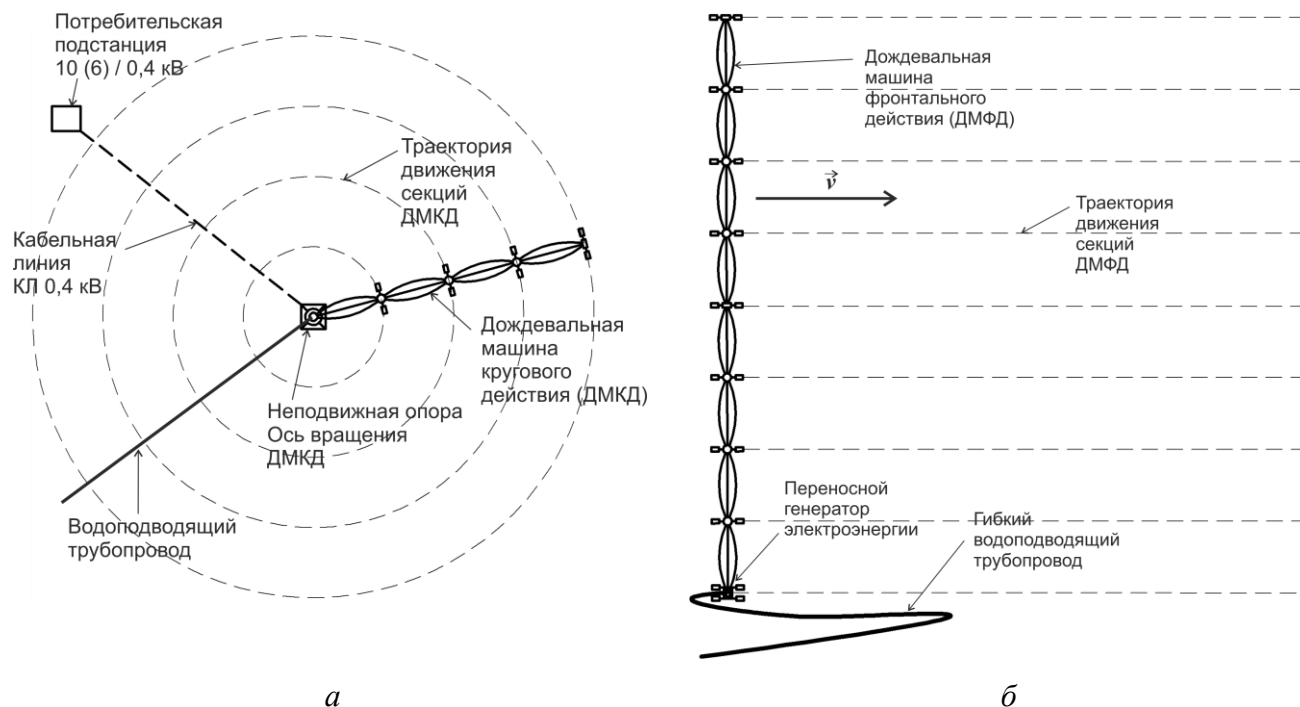


Рисунок 1.5 – Особенности действия широкозахватных дождевальных машин: *а* – кругового действия; *б* – фронтального действия

Источником электроэнергии для этих машин могут служить кабельная линия, переносной генератор и т. п.

Мелиоративные особенности ДМКД

Основная задача использования ДМ – увлажнение пахотных земель для лучшего роста культурных растений. Объем поливной воды зависит от многих условий, в первую очередь от вида культуры. По виду культуры определяют оросительную норму [48, 59, 77, 165, 219, 261, 263, 323]. Например, для яровой пшеницы в условиях возделывания сухих степей оросительная норма составляет 2500–3000 м³/га, для кукурузы – 4000–6000 м³/га [263, 323]. На основе оросительной нормы, поливной площади и особенностей рельефа определяют параметры дождевальной машины, такие, как длину водопроводящего трубопровода и его диаметр. По разным данным [137, 147–152, 183, 200, 231, 262, 263], выделяют два стандартных типоразмерных диаметра трубопровода – 159 и 219 мм с толщиной стенки не менее 2,5 и до 3,2 мм. Эти параметры необходимо соблюдать для обеспечения механической прочности водопровода при его движении с водой.

В работах Б.М. Лебедева, Н.Ф. Рыжко, А.И. Есина, Д.А. Соловьева, Л.А. Журавлевой, А.И. Рязанцева и других ученых [120, 122, 125, 126, 172, 210–

213, 216, 217, 234, 236, 240, 289] приведены данные для определения размеров водопроводящего трубопровода с точки зрения экономии водных ресурсов. В справочниках и других научных источниках [183, 219, 231, 262, 263, 308, 309, 323] даны другие мелиоративные и технические параметры ДМ. Рассмотрим некоторые параметры ДМ различных производителей (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Мелиоративные параметры ДМКД различных производителей

| Марка ДМКД | Интенсивность дождя, мм/мин | Диаметр капли, мм | Энергия капли, мкДж | Равномерность распределения дождя (коэффициент Христиансена), % | Коэффициент эффективного полива $K_{ЭФ}$, % |
|------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---|--|
| Вауер (Австрия) | 2...40 | 0,4...2,0 | 0,65 | 95 | 90 |
| ДМЭ «Фрегат» (Украина) | 2...60 | 0,6...2,0 | 0,90 | 90 | 90 |
| «Каскад» (Россия) | 2...55 | 0,6...2,5 | 1,0 | 90 | 90 |
| Zimmatic (США) | 2...85 | 0,5...2,0 | 1,0 | 95 | 90 |
| RKD (Испания) | 2...50 | 0,5...1,0 | 1,0 | 90 | 90 |
| T-L Irrigation (США) | 2...50 | 0,4...2,0 | 0,65 | 99 | 95 |
| Ocmis (Италия) | 2...60 | 0,4...2,0 | 0,65 | 95 | 90 |

Как видно из таблицы 1.7, основные параметры различных ДМ в целом различаются не более чем на 10–15 %. Отличия лишь в исполнении и дополнительных комплектациях ДМ на конкретную культуру.

Поливную норму регулируют скоростью перемещения ДМ, которая определяется параметрами ходовой части – опорными тележками ДМ. При этом различают 2 вида перемещения:

- перемещение единым лучом, когда каждая секция движется со скоростью, пропорциональной порядковому номеру относительно неподвижной опоры (рисунок 1.6, а) [105];
- дискретное перемещение каждой секции в отдельности в «старт-стоповом» режиме (рисунок 1.6, б).

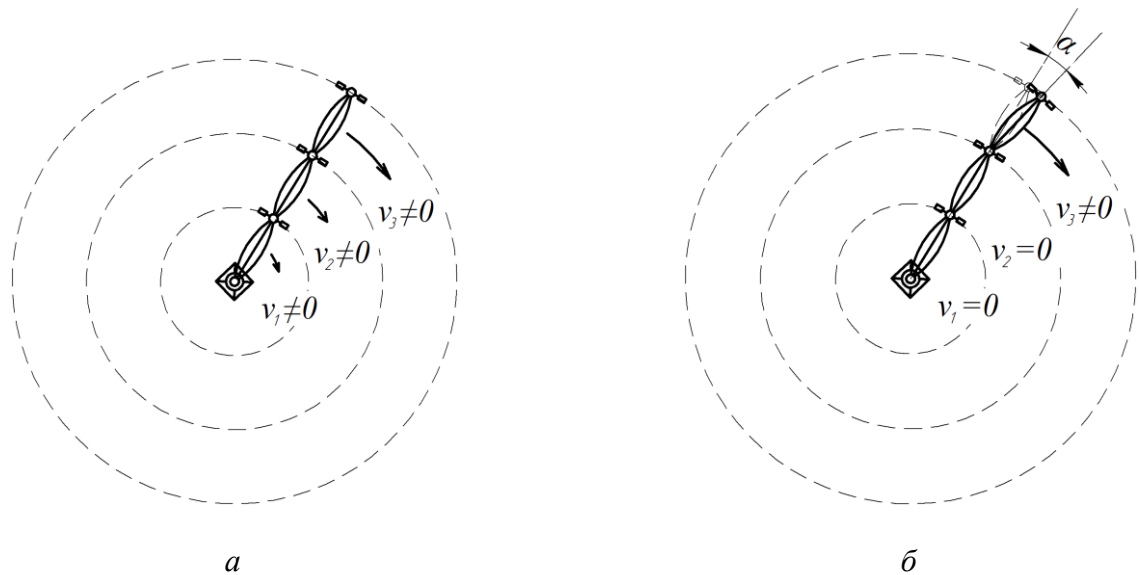


Рисунок 1.6 – Виды перемещения ДМ: *a* – единым лучом, когда скорости тележек не равны нулю и пропорциональны порядковому номеру; *б* – дискретное перемещение каждой секции в отдельности ($\alpha < 2,0^\circ$)

На основе вида перемещения разрабатывают автоматическое регулирование скоростей и строят график соответствия режима скорости с поливной нормой [105, 137, 147–152, 233]. Например, для дождевальной машины МДЭК «Каскад» (производство ООО «Мелиоративные машины», г. Саратов) установлен график, представленный на рисунке 1.7.

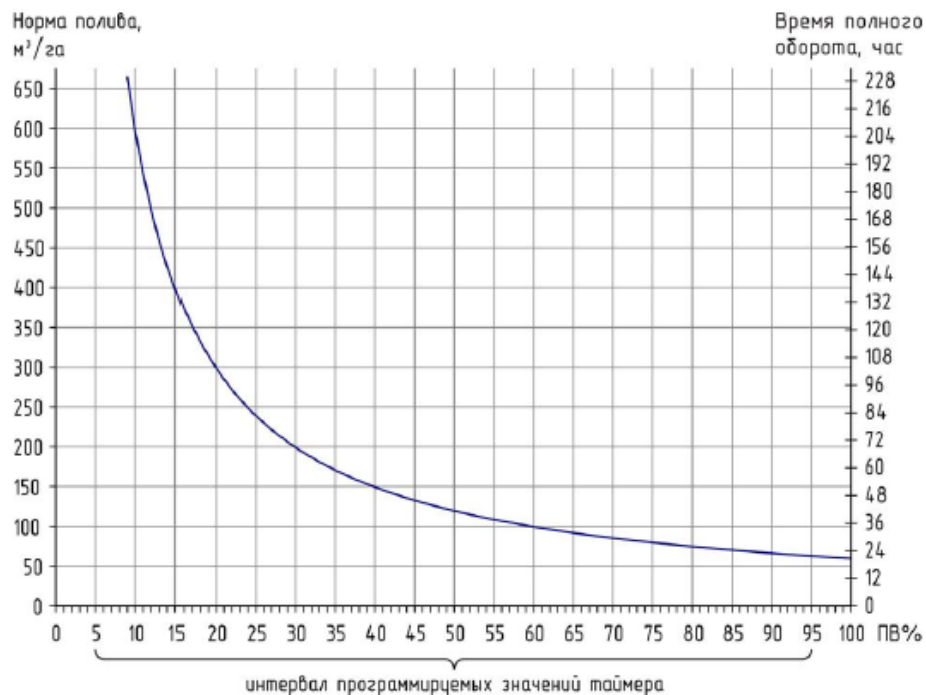


Рисунок 1.7 – График зависимости повторности включения ПВ (%) от поливной нормы

Для ДМ других производителей зависимость поливной нормы от продолжительности работы примерно одинакова, так как параметры опорных тележек имеют схожие характеристики. Отличия могут быть в схемах автоматического управления, в чувствительности элементов автоматики и т. п. Эти характеристики машин указаны в инструкциях по эксплуатации [105, 137, 147–152, 233]. Для некоторых машин они представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Поливная норма и продолжительность оборота дождевальных машин с одинаковой длиной водораспределительного трубопровода 480 м

| Марка ДМКД | Минимальные значения | | Максимальные значения | |
|------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | $m_{\text{пн}}$, м ³ /ч | t_0 , ч | $m_{\text{пн}}$, м ³ /ч | t_0 , ч |
| Bauer (Австрия) | 61 | 20,0 | 660 | 220,5 |
| ДМЭ «Фрегат» (Украина) | 70 | 20,5 | 725 | 238,4 |
| «Каскад» (Россия) | 61 | 20,7 | 664 | 230,3 |
| Zimmatic (США) | 71 | 16,2 | 734 | 189,4 |
| RKD (Испания) | 62 | 19,5 | 711 | 245,5 |
| T-L Irrigation (США) | 42 | 12,0 | 850 | 200,5 |
| Ocmis (Италия) | 60 | 20,4 | 650 | 230,3 |

Особенности транспортирования и монтажа ДМКД

Дождевальные машины кругового действия доставляют на подготовленную территорию в разобранном виде. Оборудование системы энергоснабжения, как правило, укомплектовано по типоразмеру ДМ. Значительная часть ДМКД конструктивно схожа: неподвижные опоры, фланцевые соединения трубопровода, шпренгельные фермы секций трубопровода, передвижные опорные тележки. Трудоемкость сборки машин кругового действия различных производителей (см. таблицу 1.6) приблизительно равна. Однако сборка и наладка оборудования опорных тележек, которое может быть представлено в виде гидравлического, механического или электрического привода, могут существенно различаться. Сравнить, например, электрический и гидравлический привод довольно сложно, поскольку оба имеют как преимущества, так и недостатки. Например, гидравлический привод имеет низкий КПД (около 40 %). Используя поливную воду в качестве рабочей жидкости в гидравлической системе, для него не требуется подведение дополнительной энергии. В этом случае однозначно определить оптимальный тип привода по критерию наименьшего энергопотребления возможно только путем проведе-

ния дополнительных исследований. Различные производители [105, 137, 147–152, 233] используют для опорных тележек оба типа привода. С точки зрения управления электрический привод имеет ряд преимуществ:

- большее число степеней управления;
- возможность дистанционного управления;
- контроль параметров привода;
- высокая точность регулирования;
- оперативность технического обслуживания и ремонта.

Некоторые технико-экономические параметры современных ДМКД представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Технико-экономические параметры современных ДМКД

| Марка ДМКД | Материалоемкость, кг/м | Стоимость оборудования, тыс. руб./м | Установленная мощность (max), кВт | Режим перемещения | Количество тележек, шт. | Давление на входе в машину, МПа | Длина машины (max), м |
|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Бауер (Австрия) | 33,11 | 12,5 | 12,4 | дискретный | 4...12 | 0,2...0,4 | 525 |
| ДМЭ «Фрегат» (Украина) | 34,22 | 10,0 | 12,5 | дискретный | 4...10 | 0,2...0,4 | 525 |
| ДМ «Фрегат» (Украина) | 38,82 | 10,5 | 30,0 | прерывистый | 6...20 | 0,4...0,7 | 721 |
| «Каскад» (Россия) | 33,65 | 9,5 | 10,0 | дискретный | 4...10 | 0,2...0,4 | 675 |
| Zimmatic (США) | 28,94 | 12,8 | 10,0 | дискретный | 4...10 | 0,15...0,4 | 525 |
| RKD (Испания) | 33,77 | 12,0 | 10,0 | дискретный | 4...10 | 0,2...0,4 | 525 |
| T-L Irrigation (США) | 25,48 | 13,4 | 7,5 | непрерывный | 4...8 | 0,15...0,3 | 480 |

В зависимости от типа привода производители конструируют системы энергоснабжения опорных тележек ДМ в различном исполнении [2, 36, 48, 104, 105, 137, 147–142, 177, 178, 200, 210–213, 231, 233, 235, 239, 256, 261, 263, 339] (таблица 1.10). В качестве движителей в основном используют колеса. Однако в некоторых комплектациях встречается гусеничный ход опорных тележек ДМ.

Из таблицы 1.10 видно, что большинство машин имеют электрический привод. Однако для достижения цели исследования необходимо принимать к рас-

смотрению все типы приводов, так как при сравнении различных систем энерго-снабжения в одних условиях наименьшее энергопотребление, например, будет иметь электрический привод с переносным генератором, а в других – гидравличе-ский привод.

Таблица 1.10 – Варианты энергоснабжения дождевальных машин кругового действия

| Марка ДМКД | Параметры ходовой части | | | Параметры источника энергии | | | Система передачи энергии к приводу |
|------------------------|-------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------------|
| | тип привода | тип двигателя | параметры привода одной тележки | вариант источника | параметры источника | мощность источника | |
| Вауер (Австрия) | электрический | электродвигатель переменного тока | 380 В; 0,55 кВт | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | кабельная передача |
| | | | | переносной дизельный генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| ДМЭ «Фрегат» (Украина) | электрический | электродвигатель переменного тока | 380 В; 0,55 кВт | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | кабельная передача |
| | | | | переносной дизельный генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| ДМ «Фрегат» (Украина) | гидравлический | гидродвигатель возвратно-поступательно-го действия (гидроцилиндр) | 0,4 МПа | насосная станция | 0,5...0,8 МПа | >30 кВт | трубопровод |
| | | | | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | трубопровод |
| | | | | двигатель внутреннего сгорания | 50 Н·м 1500 об/мин | 14 кВт (20 л.с.) | трубопровод |
| «Каскад» (Россия) | электрический | электродвигатель переменного тока | 380 В; 0,55 кВт | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | кабельная передача |
| | | | | переносной дизельный генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| Zimmatic (США) | электрический | электродвигатель переменного тока | 380 В; 0,55 кВт | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | кабельная передача |
| | | | | переносной дизельный генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |

| Марка ДМКД | Параметры ходовой части | | | Параметры источника энергии | | | Система передачи энергии к приводу |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| | тип привода | тип двигателя | параметры привода одной тележки | вариант источника | параметры источника | мощность источника | |
| RKD (Испания) | электрический | электродвигатель переменного тока | 380 В; 0,55 кВт | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | кабельная передача |
| | | | | переносной дизельный генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | электродвигатель постоянного тока | 48 В; 2,0 кВт | аккумулятор с солнечными панелями | 12 В | 18 кВт | кабельная передача |
| | | | | аккумулятор с кабельным питанием | 12 В; 220 В | 18 кВт | кабельная передача |
| T-L Irrigation (США) | гидравлический | гидродвигатель (гидромотор) | 0,4 МПа | двигатель внутреннего сгорания | 100 Н·м 2000 мин ⁻¹ | 44 кВт (60 л.с.) | трубопровод |
| | | | | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | трубопровод |
| | | | | кабельная линия | 220 В; 50 Гц | не ограничена | трубопровод |
| | | | | переносной дизельный генератор | 220 В; 50 Гц | 7,5 кВт·А | трубопровод |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 220 В; 50 Гц | 7,5 кВт·А | трубопровод |
| Ocmis (Италия) | электрический | электродвигатель переменного тока | 380 В; 0,55 кВт | кабельная линия | 380 В; 50 Гц | не ограничена | кабельная передача |
| | | | | переносной дизельный генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной бензиновый генератор | 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |
| | | | | переносной гидравлический генератор | 0,4 МПа; 380 В; 50 Гц | 12 кВт·А | кабельная передача |

Управление опорными тележками дождевальная машины осуществляют в соответствии с видом перемещения (см. рисунок 1.6). Наиболее распространены системы автоматического управления с дискретным перемещением секций в повторно-кратковременном («старт-стоповом») режиме [104, 105, 137, 147–152, 233]. Система управления ориентирована на двигатель (электродвигатель, гидро-

двигатель вращательного или возвратно-поступательного действия), который, как правило, односкоростной. Управляют двигателем путем ограничения (включения/отключения) подачи питания. Для гидравлических приводов применяют тросовое управление, а для электрических приводов – электромеханические приборы синхронизации движения в линию, работающие на базе концевых выключателей.

Частые пуски электродвигателей приводят к перегрузкам контактных соединений схем питания и управления, а также к негативному воздействию на источник электроэнергии. Например, при номинальном токе электродвигателя 1,5 А и кратности пускового тока 8,0 с источником питания в виде переносного генератора включение трех и более электродвигателей одновременно может привести к заклиниванию ротора генератора. Как показывает практика [333, 8, 37, 59, 92, 102, 110, 113, 128, 118, 119, 123, 146, 157, 161, 170, 181, 315, 205, 209, 223, 243, 264–266, 273], при частом срабатывании в тяжелых условиях эксплуатации до 10 % используемых концевых выключателей требуют замены после наработки машины до 100 ч.

Водопроводящий трубопровод имеет защиту от излома, которую осуществляют также приборами синхронизации движения в линию (ПСЛ). Настройку работы защиты выполняют на первом этапе запуска ДМ, так как чувствительные элементы устройств управления перемещением секций подвержены косвенным и прямым воздействиям различных факторов (ветер, пробуксовка колес, ямы, уклоны и т. п.) и должны иметь высокий уровень надежности.

Внешний вид дождевальных машин кругового действия и их систем управления ходом представлен на рисунках 1.8–1.12 [5, 105, 137, 147, 149, 200, 233, 294].

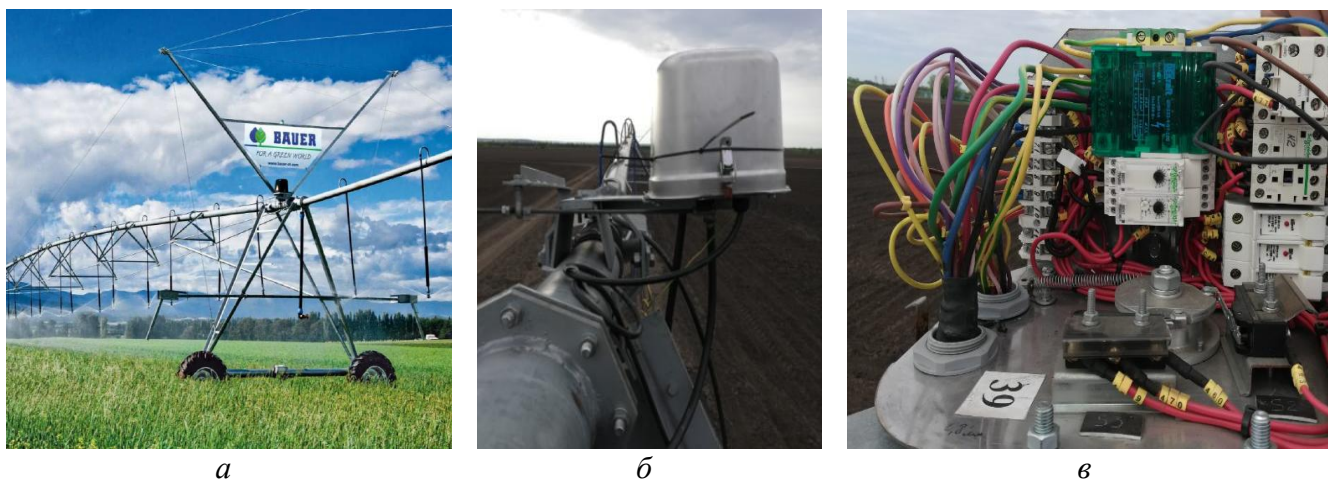


Рисунок 1.8 – Дождевальная машина Bauer: *а* – внешний вид; *б* – прибор синхронизации движения в линию; *в* – прибор ПСЛ с концевым выключателем

*а**б**в*

Рисунок 1.9 – Гидравлическая дождевальная машина «Фрегат»: *а* – внешний вид; *б* – тросовая система управления; *в* – неподвижная опора с водяным фильтром

*а**б**в*

Рисунок 1.10 – Гидравлическая дождевальная машина T-L Irrigation: *а* – внешний вид; *б* – гидромотор; *в* – тросовая система управления

*а**б**в*

Рисунок 1.11 – Дождевальная машина МДЭК «Каскад»: *а* – внешний вид; *б* – электродвигатель с редуктором; *в* – неподвижная опора с переносным дизель-генератором

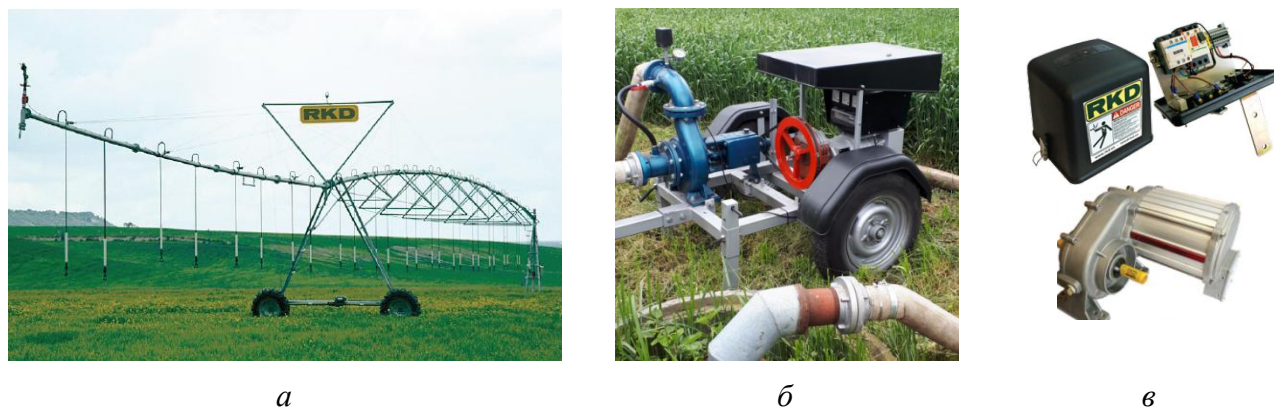


Рисунок 1.12 – Дождевальная машина RKD: *а* – внешний вид; *б* – гидрогенератор; *в* – прибор ПСЛ и электропривод

Техническое обслуживание и ремонт ДМКД

Для обслуживания ДМ назначают ответственное лицо, в обязанности которого входят регулировка скорости движения ДМ и техническое обслуживание (ТО). Состав работ по ТО конструкций для различных машин кругового действия приблизительно одинаковый. Техническое обслуживание энергетических систем опорных тележек различно по своему составу и трудоемкости. Трудозатраты, например, на ТО электропривода в 1,4 раза выше, чем гидропривода [299, 188, 262, 317].

В обычном режиме эксплуатации ДМ в состав ТО входит проверка целостности трубопровода и исправности элементов системы энергоснабжения. Если конструктивные неисправности (например, наличие течи водораспределительного трубопровода) можно определить визуально и быстро устранить в течение 1–2 ч, то устранение неисправностей, например, в элементах системы автоматического управления, может затянуться до 2 дней. Возможные неисправности в системе энергоснабжения дождевальных машин представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Характерные неисправности системы энергоснабжения ДМ

| Место неисправности, узел | Неисправность | Продолжительность устранения, ч |
|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| Передача вращения | механическое повреждение карданной передачи | 1...2 |
| Промежуточный или конечный прибор ПСЛ | залипание контактов концевого выключателя | 1...4 |
| Промежуточный или конечный прибор ПСЛ | выгорание контактов магнитного пускателя | 1...4 |
| Кабельная линия | замыкание на корпус дождевальной машины | 1...6 |
| Тросовая система управления | перетирание троса | 5...20 |
| Гидравлическая линия | прорыв системы рабочей жидкости | 2...6 |
| Щит управления | выгорание контактов магнитного пускателя | 1...4 |

Показатели надежности работы дождевальная машины оцениваются уровнем надежности элементов энергоснабжения, а также условиями их эксплуатации. По данным литературных источников [5, 105, 137, 147–152, 183, 200, 231, 233, 294, 323] показатели надежности ДМ и некоторых узлов машин сведены в таблицу 1.12.

Таблица 1.12 – Показатели надежности современных ДМ

| Марка ДМКД | Вероятность безотказной работы (1000 ч), % | Наработка на отказ, ч | Гарантийный срок, лет/мото-ч | Срок службы, лет |
|------------------------|--|-----------------------|------------------------------|------------------|
| Bauer (Австрия) | 99 | 1860 | 1/1000 | 25 |
| ДМЭ «Фрегат» (Украина) | 90 | 1200 | 2/1000 | 25 |
| ДМ «Фрегат» (Украина) | 90 | 1200 | 2/1000 | 25 |
| «Каскад» (Россия) | 99 | 1760 | 1/1000 | 25 |
| Zimmatic (США) | 94 | 1900 | 2/1000 | 25 |
| RKD (Испания) | 92 | 1680 | 2/1000 | 25 |
| T-L Irrigation (США) | 99 | 2440 | 8/1600 | 30 |
| Ocmis (Италия) | 96 | 1610 | 2/600 | 25 |

Гарантийный срок (ГС) службы производители дают под конкретного заказчика. Он зависит от квалификации обслуживающего персонала, условий и режима полива, обслуживания и хранения в межсезонный период. Украинские производители [180, 200, 268] имеют соглашения о повышении ГС до 5 лет или наработки 3000 мото-ч. Российские производители машин МДЭК «Каскад», Irrigreat, ООО «БСГ» – до 2 лет или наработки 1500 мото-ч [36, 178, 187, 233, 254, 309]. Значительная часть отечественных и зарубежных производителей используют электрические двигатели с редуктором марки УМС (США), степень защиты которых IP 56, а запас прочности электрической части (обмотки, контакты) от перегрузок в 1,8–2,5 раза превышает запас прочности электродвигателей серии 5А той же мощности (0,55 кВт) [61, 109, 122, 119, 161, 151, 316].

Хранение ДМКД

В межсезонный период ДМ элементы системы энергоснабжения консервируют. В электрифицированных машинах консервации подлежат электродвигатели, провода и кабели, приборы ПСЛ, щит управления и источник энергии, поскольку низкие температуры зимой и постоянное воздействие солнечных лучей приводят к быстрому старению изоляции. Также в зимний период оборудование набирает влагу в открытые части и щели, что может привести к появлению различных замыканий при подаче электроэнергии [73, 118, 119, 314, 357].

В гидравлических системах негативному воздействию солнечных лучей подвергаются гибкие трубопроводы. При перепадах температур трубопроводы передачи рабочей жидкости подвержены термодинамическому сжатию/расширению. Так, при неправильной подготовке к зимнему сезону могут образоваться течи, разрывы и т. п. Гидродвигатели и насосы также необходимо освободить от рабочей жидкости. После хранения подготовку к сезону начинают с расконсервации оборудования и его проверки на соответствие требованиям ввода в эксплуатацию (включения в работу).

Таким образом, анализ эксплуатационных характеристик показал, что дождевальные машины кругового действия нового поколения отвечают мелиоративным требованиям по созданию качественного полива.

Рассмотрев ДМ отечественных и зарубежных производителей, можно выделить ряд отличий в элементах системы энергоснабжения. Например, на рынке предлагают машины нового поколения с электрическими (52 %) и гидравлическими (39 %) приводами. Источниками питания для ДМ могут быть кабельная линия, переносной дизельный генератор, переносной бензиновый генератор, дизельный двигатель внутреннего сгорания, бензиновый двигатель внутреннего сгорания, аккумулятор с зарядом от кабельной линии, аккумулятор с зарядом от солнечных батарей, насосная станция и т. п. Передача энергии приводам осуществляется кабельной линией или системами гидравлического трубопровода. Такое разнообразие позволяет определить около 40 вариантов энергоснабжения опорных тележек ДМ. С точки зрения технической эксплуатации большинство машин имеют одинаковый уровень надежности. Трудоемкость работ по ТО и ремонту электрического и гидравлического привода существенно различается. Поэтому следует оценить потребление энергии каждой системой энергоснабжения ДМ.

1.3 Анализ энергопотребления дождевальных машин кругового действия с различными системами энергоснабжения

Энергопотребление зависит от мощности оборудования системы энергоснабжения дождевальной машины и продолжительности его работы. Технологический процесс определяет режим работы каждого оборудования, в результате че-

го можно рассчитать суммарное энергопотребление. При известной цене за единицу энергоресурса (тарифе) стоимость потребленной энергии входит в состав эксплуатационных затрат, расчет которых, как правило, проводят по истечении года. В их структуру также входят затраты на обслуживание и ремонт, ущерб, оцененный в стоимостном виде. В нашем случае важно рассчитать долю стоимости энергопотребления на движение опорных тележек дождевальная машины относительно общих эксплуатационных затрат. Анализ показал, что для нового оборудования доля стоимости энергопотребления составляет большую часть (около 85 %) в структуре эксплуатационных затрат. Структура затрат в первый год эксплуатации (рисунок 1.13, *а*) и спустя несколько лет (рисунок 1.13, *б*) существенно отличается [25, 35, 45, 47, 61, 118, 119, 167, 168, 193, 204, 227, 267, 274, 275, 277, 313, 344].



Рисунок 1.13 – Структура эксплуатационных затрат для МДЭК «Каскад» с переносным дизель-генератором: *а* – в первый год эксплуатации; *б* – на пятый год эксплуатации

В начале срока эксплуатации доля стоимости энергии, потребленной на движение машины, составляет около 83 % эксплуатационных затрат, а через несколько лет она уменьшается до 46 %, так как возрастают затраты на обслуживание и ремонт переносного дизель-генератора. При этом при выполнении ремонтных работ требуются дополнительные затраты на электроэнергию или другой вид энергии, которые никак не связаны со стоимостью энергии, потребленной на движение ДМ.

Как отмечалось в предыдущем пункте, различные системы энергоснабжения дождевальных машин с электрическим и гидравлическим приводом имеют различные эксплуатационные затраты. Важно оценить соотношение стоимости

энергии, потребленной на движение, и эксплуатационных затрат дождевальную машины. По данным различных источников [11, 47, 201, 52, 118, 119, 183, 250, 274, 360], это соотношение характеризуется коэффициентом стоимости потребленной электроэнергии:

$$k_{\text{ПЭ}} = \frac{c_p W}{z}, \quad (1.1)$$

где c_p – цена за единицу ресурса, руб./кВт·ч; W – количество электроэнергии, потребленной на движение ДМ, кВт·ч; z – эксплуатационные затраты, включая затраты на ресурс, руб.

Анализ данного коэффициента показывает, что чем ниже его значение, тем меньшее количество энергии (в числителе) должно потреблять оборудование системы энергоснабжения ДМ. Однако по этому параметру нельзя точно оценить эффективность системы энергоснабжения, так как при незначительном потреблении энергии и отсутствии затрат на обслуживание и ремонт оборудования коэффициент будет иметь высокое (близкое к единице) значение. Данный коэффициент выступает как характерный показатель системы, нежели показатель сравнения. Вместе с этим важным показателем является цена на энергоресурс. Использование дешевого ресурса позволяет снизить суммарные эксплуатационные затраты. Для электрических систем $k_{\text{ПЭ}}$ составляет 0,62; для систем с горючим топливом – 0,41; для гидравлических систем – 0,70.

Учет потребления энергии дождевальными машинами следует вести совместно с потреблением энергии насосом, который подает воду с необходимым давлением к ДМ. Так, например, для некоторых гидравлических систем насос водоподдачи является источником энергии гидроприводов, т. е. энергия, потребляемая насосом для водоподдачи, и энергия, потребляемая на движение машины, совмещены. Поэтому для объективной оценки энергозатрат необходимо учитывать параметры насоса.

Рассмотрим энергопотребление гидравлической системы энергоснабжения на примере ДМ «Фрегат». Энергия расходуется на создание давления в водопроводящем и водораспределительном трубопроводах и в гидродвигателях для передачи момента вращения колесам. Сведем данные энергопотребления в таблицу 1.13.

Таблица 1.13 – Энергопотребление ДМ «Фрегат» (10 секций)

| Показатель | Гидродвигатель машины | Блок управления | Электродвигатель насоса |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|
| Мощность, кВт | 0,4 | 0,03 | 75 (min) |
| Продолжительность работы за сезон, ч | 450 | 300 | 500 |
| КПД | 0,36 | 0,07 | 0,72 |
| Потребление энергии, кВт·ч | 1200 | 90 | 37500 |
| Потери энергии, кВт·ч | – | – | 9400 |
| Цена электроэнергии, руб./кВт·ч | – | – | 4,55 |
| Стоимость электроэнергии, тыс. руб. | – | – | 170,62 |

Примечание. Гидродвигатели возвратно-поступательного действия и узлы управления имеют различную продолжительность работы, которая определяется порядковым номером секции ДМ.

Из таблицы 1,13 видно, что потребление энергии насосом значительно (в 20,8 раза) выше потребления энергии гидродвигателями и блоками управления. Большая часть потерь энергии приходится на подачу поливной воды (около 25 %). Потери энергии в гидродвигателях системы энергоснабжения опорных тележек ДМ составляют 6–9 % общего количества потребленной энергии [18, 60, 83, 98, 201]. Энергия, потребленная на движение ДМ, – 1–2 %. Это связано с тем, что значительная часть энергии рабочей жидкости затрачивается для создания высокого давления в гидроприводе (до 0,6 МПа).

Потребление энергии в целом по машине определяют по мощности одного или нескольких электродвигателей насосов. Мощность электродвигателя, как правило, принимают с запасом [98, 276, 350]. В результате потребляемая энергия обеспечивает созданный запас, водоподачу, гидравлические потери в трубопроводе, энергопреобразование вращения колес и потери в оборудовании гидравлического привода.

В электрифицированных ДМ нового поколения энергопотребление водоподдачи и перемещения опорных тележек ДМ разделено. Водоподачу обеспечивает насос, который создает необходимое давление в трубопроводе ДМ и дождеобразующих устройствах, а движение опорных тележек обеспечивает отдельная система энергоснабжения, в которую входит отдельный источник энергии. Энергопотребление для электрифицированных машин приведено в таблице 1.14 на примере дождевальнoй машины МДЭК «Каскад».

Таблица 1.14 – Энергопотребление МДЭК «Каскад» (10 секций)

| Показатель | Электродвигатель машины | Прибор ПСЛ | Электродвигатель насоса | Питание опорных тележек (варианты) | | |
|--------------------------------------|----------------------------|------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| | | | | кабельная линия | дизельный генератор | бензиновый генератор |
| Мощность, кВт | 0,55 | 0,05 | 45 | 3,65 | 10,0 | 10,0 |
| Продолжительность работы за сезон, ч | 450 | 450 | 500 | 450 | 450 | 450 |
| КПД | 0,96 | 0,80 | 0,72 | 0,77 | 0,36 | 0,32 |
| Потребление энергии, кВт·ч | – | – | 22500 | 1643 | 4500 | 4500 |
| Потери энергии, кВт·ч | – | – | – | 418 | 3275 | 3275 |
| Цена электроэнергии, руб./кВт·ч | – | – | 4,55 | 4,55 | 12,45 | 12,64 |
| Стоимость электроэнергии, тыс. руб. | – | – | 102,37 | 7,5 | 56,03 | 56,88 |

Примечание. Электроприводы и приборы синхронизации движения в линию (ПСЛ) имеют различную продолжительность работы, которая определяется порядковым номером секции ДМ.

Анализируя данные таблицы 1.14, можно сделать вывод о более высоком КПД системы энергоснабжения с кабельной линией (около 74 %) по сравнению с системой с переносным генератором (около 30 %).

Существенная разница энергопотребления определена видом источника электроснабжения. Переносной генератор может работать на холостом ходу в недогруженном режиме и ограничен по мощности. Централизованная сеть электроснабжения имеет существенно больший запас мощности. Очевидно, что кабельная линия обеспечивает электроэнергией в том количестве, которое необходимо системе. Энергопотребление системы энергоснабжения ДМ с кабельной линией в 2,7 раза меньше, чем системы с переносным генератором.

Несмотря на существенную разницу энергопотребления, переносные генераторы в 50 % случаях используют для обеспечения электроэнергией электрифицированных дождевальных машин.

В некоторых электрифицированных машинах в качестве источника энергии системы энергоснабжения используют гидрогенератор. Тогда первоисточником будет также насос водоподдачи. Кинетическая энергия потока поливной воды в гидрогенераторе преобразуется во вращательное движение через насос, установленный перед водораспределительным трубопроводом ДМ. Такие генераторы применяют в условиях сложности подведения кабельной линии или покупки пе-

ренного генератора на жидком топливе. На рисунке 1.12 показан внешний вид гидрогенератора дождевальной машины марки RKD. Рассмотрим данные энергопотребления такой системы (таблица 1.15).

Таблица 1.15 – Энергопотребление ДМ RKD (10 секций)

| Показатель | Электродвигатель опорной тележки (10) | Прибор ПСЛ | Электродвигатель насоса | Питание опорных тележек – гидрогенератор |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------------|-------------------------|--|
| Мощность, кВт | 0,55 | 0,05 | 60 | 10,0 |
| Продолжительность работы за сезон, ч | 450 | 450 | 500 | 450 |
| Давление воды, МПа | | | | |
| на входе в генератор | – | – | – | 0,42 |
| на выходе из генератора | | | | 0,34 |
| КПД | 0,96 | 0,80 | 0,72 | 0,44 |
| Потребление энергии, кВт·ч | 1000 | 225 | 30000 | 4500 |
| Потери энергии, кВт·ч | – | – | 7750 | – |
| Цена электроэнергии, руб./кВт·ч | – | – | 4,55 | – |
| Стоимость электроэнергии, тыс. руб. | – | | 130,9 | – |

Примечание. Электроприводы и приборы синхронизации движения в линию (ПСЛ) имеют различную продолжительность работы, которая определяется порядковым номером секции ДМ.

Такая система схожа с системой энергообеспечения ДМ «Фрегат». Однако в этом случае электроэнергия, вырабатываемая генератором, обеспечивает работу электрического привода, а итоговое потребление энергии определяют по насосу водоподдачи. При этом должно выполняться условие создания требуемого входного давления на гидрогенераторе и гидранте ДМ. В противном случае гидрогенератор не выйдет в режим номинальных значений мощности и напряжения. Преимуществом такого способа по сравнению с системами ДМ «Фрегат» является, например, исключение подачи высокого давления, которое приводит к течи в водораспределительном трубопроводе и другим неполадкам гидролиний.

В дождевальных машинах T-L Irrigation, которые работают на гидравлическом приводе, выполненном в виде гидродвигателей вращательного действия на каждое колесо опорной тележки, энергоснабжение обеспечивается с помощью одним из трех источников: кабельной линии, переносного генератора электроэнергии или

двигателя внутреннего сгорания, работающего на жидком топливе. Все источники энергии обеспечивают работу насоса напорной гидрролинии. В гидравлической системе управления замкнутого типа создается постоянное высокое давление рабочей жидкости (специальная Hydroclear или другая низкотемпературная жидкость) [105, 149]. Рассмотрим энергопотребление для такой системы (таблица 1.16).

Таблица 1.16 – Энергопотребление ДМ T-L Irrigation (10 секций)

| Показатель | Гидродвигатель (20 шт.) | Система управления | Электродвигатель насоса | Питание опорных тележек (варианты) | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | | кабельная линия | дизельный генератор | бензиновый генератор | ДВС на жидком топливе |
| Мощность, кВт | 0,025...0,25 | 0,05 | 30 | 4,0 | 7,5 | 7,5 | 14,7 |
| Продолжительность работы за сезон, ч | 450 | 450 | 500 | 450 | 450 | 450 | 460 |
| КПД | 0,60 | 0,55 | 0,72 | 0,77 | 0,36 | 0,36 | 0,3 |
| Потребление энергии, кВт·ч | 1125 | 225 | 15000 | 1800 | 3375 | 3375 | 6762 |
| Потери энергии, кВт·ч | – | – | – | 675 | 2250 | 2250 | 4655 |
| Цена электроэнергии, руб./кВт·ч | – | – | 4,55 | 4,55 | 12,45 | 12,64 | – |
| Стоимость электроэнергии, тыс. руб. | – | – | 68,3 | 8,2 | 42,01 | 42,66 | 26,4 |
| Расход топлива, л/ч | – | – | – | – | – | – | 1,3 |
| Цена топлива, руб./л | – | – | – | – | – | – | 44,05 |

Стоимость источников энергии также бывает различной. При этом выбор сводится не только к определению источника меньшей стоимости. Большое значение имеют простота использования, трудоемкость обслуживания и монтажа и другие показатели [105, 149, 293, 294].

Несмотря на разнообразие цен и уровня энергопотребления, в дождеваль-ных машинах применяют все виды источников [105, 149, 294] (рисунок 1.14).

На выбор источника влияет множество внутрисистемных факторов и условий эксплуатации. В первую очередь – принятый вид привода (электрический или гидравлический), далее – принятая система передачи энергии и система управления [104, 105, 137, 147–152, 233, 294]. Сведем некоторые экономические показатели источников энергии в таблицу 1.17.



Рисунок 1.14 – Применение различных источников энергии опорных тележек ДМ

Таблица 1.17 – Экономические показатели некоторых источников энергии ДМ

| Оборудование | Наименьшая стоимость, руб./ед. | Стоимость доставки и монтажа, руб./ед. | Средняя стоимость технического обслуживания, руб./ед. | Средняя стоимость ремонта, руб./ед. |
|--|--------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| Кабельная линия (АВВГ 4×35) | 124,55 | 100,0 | 4,20 | 75,0 |
| Переносной дизель-генератор АМПЕРОС LDG12 LS 3 | 238 400 | 11 250 | 3 450 | 78 200 |
| Переносной бензиновый генератор KIPOR KGE 12E3 | 142 100 | 8 990 | 5 670 | 82 800 |
| Переносной гидрогенератор Месс Alte ECP3-2L/4 | 328 400 | 12 400 | 3 890 | 56 400 |
| Аккумуляторные батареи Delta 12V 50 Ah | 9 450 | – | 250 | – |

Анализируя разницу потребления энергии ДМ с различными системами энергоснабжения, можно заключить, что наряду с различной номинальной мощностью оборудования влияют также место расположения поливного участка, его рельеф и возделываемая культура. Например, при значительной удаленности поливного участка от насосной станции и удовлетворительном состоянии насосного оборудования (рисунок 1.15) возможно применение дополнительного (бустерного) насоса на входе в водораспределительный трубопровод.



Рисунок 1.15 – Вид насосного оборудования

В некоторых случаях применение таких источников энергии, как кабельная линия или насос водоподачи, становится нецелесообразным, когда удаленность от централизованных систем электроснабжения или водоема достигает нескольких десятков километров (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Удаленность поливного участка от централизованной сети электроснабжения в Марковском р-не Саратовской обл.

Таким образом, энергопотребление оборудования различных систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия существенно различается – в 1,5–4,2 раза. Несмотря на это, используют все системы энергоснабжения ДМ.

Анализ изложенных данных показывает, что причина завышенного энергопотребления кроется в применении различных типоразмеров электрического и гидравлического приводов, в различном уровне потерь энергии (включая системы управления), а также в различном режиме работы таких систем. Кроме того, установлено, что на выбор системы энергоснабжения влияют стоимость и условия эксплуатации дождевальной машины. Однако зависимость выбора источника и типа привода опорных тележек ДМ в конкретных условиях использования не прослеживается. Практика показывает, что в одних и тех же условиях применяют ДМ с различными системами энергоснабжения.

1.4 Оценка структуры энергопотребления искусственного орошения дождевальными машинами

Полив электрифицированными дождевальными машинами имеет четкую структуру потребления энергии. Этапы потребления энергии водоподдачи и водораспределения разделим на несколько составляющих. Водоподача включает в себя потребление энергии насоса, в том числе потери на передачу, потери на создание дождя. Водораспределение включает в себя энергопотребление электродвигателей, а также системы автоматического управления и защиты, в том числе потери на передачу электроэнергии от источника (например, трансформаторной подстанции) до электроприводов опорных тележек дождевальной машины (рисунок 1.17).

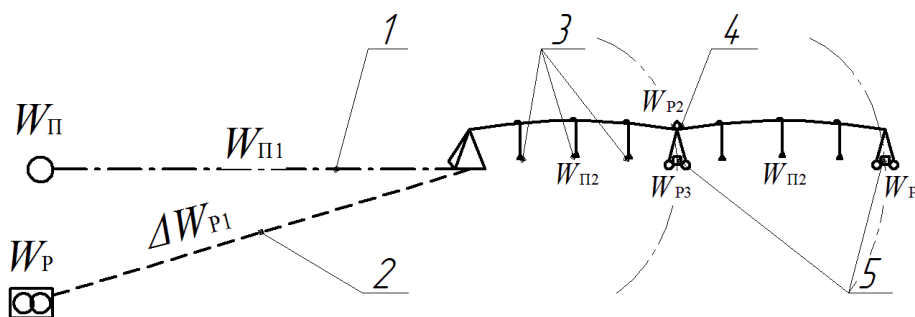


Рисунок 1.17 – Структура энергопотребления полива дождевальными машинами:
1 – водоподводящий трубопровод; 2 – питающая кабельная линия; 3 – дождеобразующие устройства; 4 – прибор синхронизации движения в линию; 5 – электродвигатели опорных тележек

Энергопотребление полива определяется:

$$W = W_{\Pi} + W_{P}, \quad (1.2)$$

где W_{Π} – энергопотребление водоподдачи, кВт·ч; W_{P} – энергопотребление водораспределения (в данном случае представлена кабельная линия, запитанная от централизованной сети электроснабжения – трансформаторной подстанции), кВт·ч;

$$W_{\Pi} = W_{\Pi 1} + W_{\Pi 2}; \quad (1.3)$$

$$W_{P} = W_{P 1} + W_{P 2} + W_{P 3}, \quad (1.4)$$

где $W_{\Pi 1}$ – потери энергии на передачу потока поливной воды на расстояние, кВт·ч; $W_{\Pi 2}$ – преобразование энергии потока в дождь с обеспечением поливной нормы, кВт·ч; $W_{P 1}$ – потери электроэнергии при передаче на расстояние, кВт·ч; $W_{P 2}$ – преобразование энергии в системе управления и защиты электродвигателей, кВт·ч; $W_{P 3}$ преобразование энергии в электродвигателях, кВт·ч.

В различных условиях эксплуатации энергопотребление насоса зависит от расстояния от насосной станции до дождевальная машины. Поэтому при оценке структуры энергопотребления будем ориентироваться на средние значения параметров таблицы 1.18.

Таблица 1.18 – Параметры энергопотребления составляющих полива

| Параметры | | Водоподача | Водораспределение |
|--|--|---|--|
| Энергопотребление Основного электроприемника | Продолжительность полива, ч | t_p | t_p |
| | Мощность электроприемника (насоса и электродвигателя), кВт | $P_{\text{нас}} = \frac{k_3 \rho g Q_n H}{\eta_n \eta_{\text{пер}}}$ | $P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{max}} \omega_{\text{рм}}}{\eta_{\text{дв}}}$ |
| | Количество | 1 | 6...10 |
| Загрузка, % | | 25–100 | 60–80 |
| Потери при передаче | | $H_{\Pi} = \left(H_0 + \frac{\lambda v_b^2}{2d_{\text{внут}} g} \right)$ | $\Delta P = I^2 \frac{\rho_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}}$ |
| Потери на управление и защиту | | $P_{\text{СЗАп}} = (0,01...0,05)P_{\text{нас}}$ | $P_{\text{СЗАр}} = (0,05...0,1)P_{\text{дв}}$ |
| Потери в дождеобразующих устройствах | | $H_{\text{д}} = \frac{0,43R'}{1 - \frac{0,14R'}{d_o}}$ | – |

Примечание. k_3 – коэффициент запаса по мощности, о.е.; ρ – плотность воды, кг/м³; Q_n – подача насоса, м³/с; H – общий напор, создаваемый насосом, м; η_n – КПД насоса; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи; M_{max} – максимальный момент рабочей машины, Н·м; $\omega_{\text{рм}}$ – угловая скорость рабочей машины, рад/с; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД насоса; $d_{\text{внут}}$ – диаметр трубопровода, м; l – длина трубопровода, м; H_0 – сумма статистического напора и напора на выходе трубопровода, м; λ – коэффициент гидравлических потерь на трения движения воды в трубопроводе; v_b – скорость движения воды в трубопроводе, м/с; I – сила тока в кабельной линии (КЛ), А; $\rho_{\text{пр}}$ – удельное сопротивление проводов КЛ, Ом·м/мм²; $l_{\text{пр}}$ – длина КЛ, м; $S_{\text{пр}}$ – сечение проводов КЛ, мм²; $H_{\text{д}}$ – напор на дождеобразующем устройстве, м; R' – радиус захвата дождем, м; d_o – диаметр сопла насадки, мм.

Примем среднестатистические значения параметров, а также условий эксплуатации дождевальных машин и на их основе сформируем структуру энергопотребления полива (таблице 1.19).

Таблица 1.19 – Структура энергопотребления полива, %

| Водоподача | | Водораспределение | | |
|--|--|-------------------------------------|---|--|
| 88–95 | | 5–12 | | |
| <i>в том числе</i> | | | | |
| Потери энергии в водоподводящем трубопроводе | Потери энергии в дождеобразующих устройствах | Потери в линии при передаче энергии | Преобразование энергии в электродвигателях опорных тележек ДМ | Преобразование энергии в системах управления и защиты электродвигателей опорных тележек ДМ |
| 32–78 | 8–16 | 0,05–1,0 | 4,8–10,5 | 0,2–0,5 |

Таким образом, повысить энергетическую эффективность полива путем разработки способов и средств энергоснабжения дождевальных машин, которые в структуре полива относятся к водораспределению, можно в пределах указанного диапазона (см. таблицу 1.19). Как видно из таблицы 1.19, часть потерь энергии водораспределения составляют потери при передаче от источника до дождевальной машины – 0,05–1,0 %. Использование переносных дизельных (бензиновых) генераторов позволяет исключить большую часть этих потерь, но стоимость полученной энергии от таких источников в 2,0–4,0 раза выше стоимости электроэнергии централизованного источника электроснабжения. Поэтому совершенствование альтернативных способов питания дождевальных машин (например, аккумуляторного источника питания) в комплексе с применением возобновляемых источников энергии становится актуальным направлением исследования.

Снижение нагрузки на электропривод опорных тележек дождевальных машин и совершенствование систем его управления также являются одним из направлений повышения энергетической эффективности в пределах полученных данных (см. таблицы 1.19).

1.5 Анализ научных достижений в области ресурсо- и энергосбережения искусственного орошения эксплуатации дождевальными машинами кругового действия

Эффективность полива оценивается многими показателями. При поливе широкозахватными дождевальными машинами кругового действия ориентируются на разработку ресурсо- и энергосберегающих технологий. Роль научных исследований, описанных в диссертациях на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, а также в других научных трудах (научные статьи, научные доклады и т. п.), является основополагающей.

Вопросы ресурсосбережения, под которыми понимаются разработки, мероприятия, методы, способствующие снижению материало- и металлоемкости, потерь водного и других ресурсов, а также повышение производительности полива орошаемыми средствами частично связаны с энергосбережением.

Некоторые вопросы раскрываются в диссертационной работе Л.А.Журавлевой (научный консультант Д.А. Соловьев, Саратов, 2018 г.) «Ресурсосберегающие широкозахватные дождевальные машины кругового действия» [120, 122, 125, 126, 257, 259]. Автор повышает эффективность широкозахватных дождевальных машин кругового действия (ШДМ) за счет конструктивно-технологических решений: разработаны математические модели водораспределительного трубопровода ДМ для постоянного и изменяющегося диаметра трубы по длине, даны рекомендации выбора ходовых систем с уточнением несущей способности почвы и нормы полива, предложены также другие конструктивные решения. В работе предложены выражения гидравлических решений, позволяющие проектировать эффективные ДМ с точки зрения качества полива и дождя, снижения подачи и мощности насоса. Однако при этом не рассматриваются такие вопросы, как, например, при изменении диаметра изменится нагрузка на электропривод опорных тележек ДМ и на насос водоподдачи с учетом появления дополнительных потерь при сниженном диаметре трубопровода. В работе также не раскрыты условия эксплуатации эффективных дождевальных машин.

Похожие вопросы повышения эффективности полива многоопорными дождевальными машинами подробно изложены в работе Б.П. Фокина (Ставрополь,

2002 г.) [293, 294]. Разработанные технологии в работе автора направлены на рациональные схемы полива фронтальными ДМ, а также на разработку способов и средств, позволяющих перевести работу машин с гидравлическим приводом ДМ «Фрегат» на пониженное давление, что в совокупности приводит к повышению энергетической эффективности полива. Однако в этом случае рассматриваются дождевальные машины, работающие в конкретных условиях, и предложенные способы решают лишь частные задачи, а, например, такие факторы, как надежность гидропривода, его эксплуатационные затраты не рассматриваются. Вместе с этим технологии орошения в настоящий момент развиты с применением электропривода опорных тележек меньшей мощности, для которых требуется более низкое давление на гидранте.

С учетом современных тенденций развития орошения раскрыты вопросы эффективности полива на основе ресурсной модели «агрolandшафт-технология», исключая деградацию сельскохозяйственных земель и водных объектов в работе А.Е. Хаджиди (научный консультант А.Д. Гумбаров, Краснодар, 2018 г.) [107, 170]. Автор предлагает обоснованные решения на основе моделей ресурсосберегающих технологий, что в совокупности определяет энергетическую эффективность полива. Однако в целом исследования направлены на эффективность и качество полива, при этом не раскрыты энергетические показатели полива разрабатываемого мелиоративного комплекса

Общие методические вопросы повышения энергетической эффективности дождевальных машин фронтального действия раскрыты в диссертационной работе З.Ш. Юлдашева (научный консультант В.Н. Карпов, Санкт-Петербург, 2018 г.) [144, 145, 320, 321]. Автором введен коэффициент энергоэффективности, который адаптирован для нестационарных мобильных автономных агрегатов на примере широкозахватной дождевальной машины (ШДМ) фронтального действия «Кубань-Л»:

$$Q_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{к}}}, \quad (1.5)$$

где $Q_{\text{э}}$ – относительная энергоемкость процесса; $Q_{\text{н}}$ – количество подводимой энергии, МДж; $Q_{\text{к}}$ – количество необходимой энергии для выполнения процесса, МДж,

а также коэффициент энергетического состояния $K_{ЭС}$:

$$K_{ЭС} = \frac{Q_{Э\text{ факт.}}^{\text{сист.}}}{Q_{Э\text{ баз.}}^{\text{сист.}}}, \quad (1.6)$$

где $Q_{Э\text{ факт.}}^{\text{сист.}}$ – фактическая относительная энергоёмкость системы ШДМ; $Q_{Э\text{ баз.}}^{\text{сист.}}$ – базовая относительная энергоёмкость системы ШДМ.

На основе $K_{ЭС}$ сравниваются варианты питания ДМ от дизельного генератора и от кабельной линии централизованного источника питания. Для каждого варианта показана энергетическая диаграмма, на которой указаны три параметра: подводимая (затраченная) энергия, продолжительность работы системы и один из параметров водоподдачи или поливной площади (рисунок 1.18).

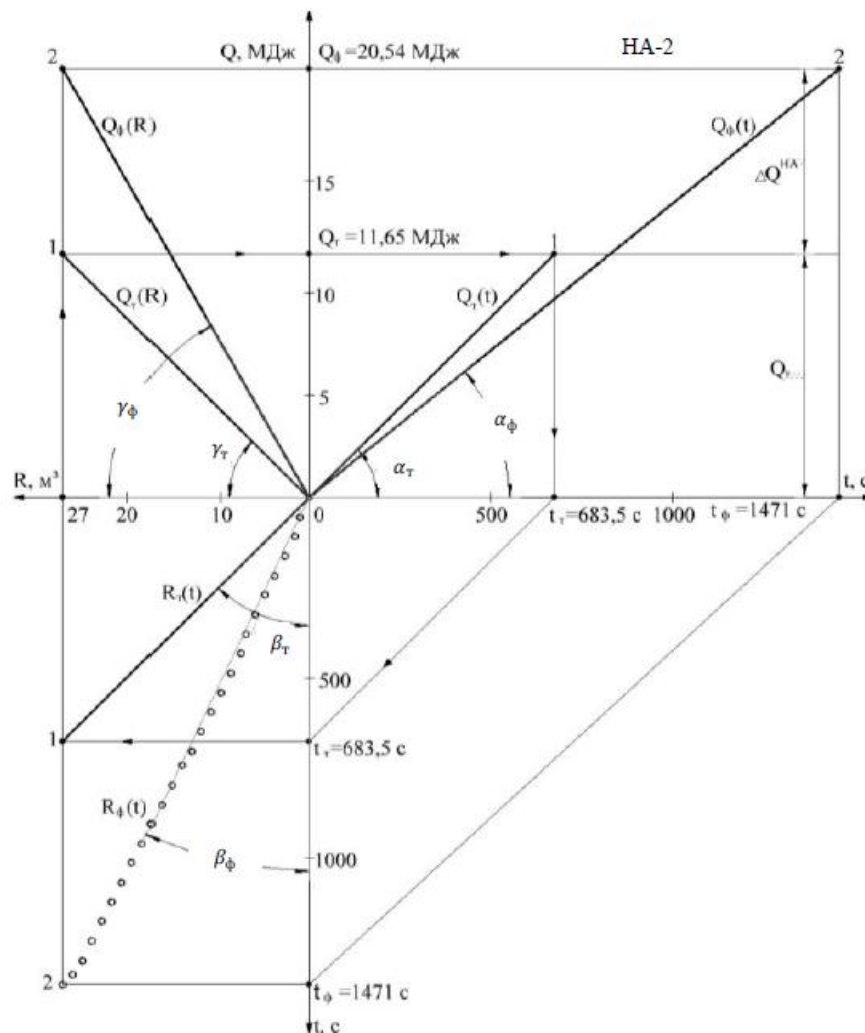


Рисунок 1.18 – Энергетическая диаграмма энергоэффективности работы насосного агрегата НА-2 (авторы З.Ш. Юлдашев, В.Н. Карпов)

Полученные автором результаты позволяют объективно сравнить энергетическую эффективность ДМ фронтального действия, работающих в конкретных

условиях эксплуатации. Однако детально определить параметры, от которых зависит энергопотребление, нельзя. Например, при сравнении источников питания не учитываются длина кабельной линии, варианты подключения к трансформаторной подстанции и протяжки кабельной линии, что существенно увеличивает эксплуатационные затраты для ДМ фронтального действия, в отличие от машин кругового действия, у которых одна сторона закреплена (неподвижная опора).

Смежные вопросы повышения энергетической эффективности полива дождевальными машинами (а именно повышение эффективности использования электрооборудования технологических комплексов орошаемого земледелия) раскрыты в диссертационной работе И.Г. Стрижкова (научный консультант А.А. Пястолов, Краснодар, 2001 г.) [270, 271, 272]. Автором созданы и проверены синхронные двигатели с двойной якорной обмоткой для привода дождевальных машин и насосов. Подробно рассмотрены пусковые режимы таких электродвигателей, для снижения пусковых токов которых разработан и исследован способ переключения якорной обмотки на период асинхронного разбега. Однако данные исследования относились к ДМ предыдущего поколения, укомплектованным двигателями гораздо большей мощности. Поэтому предложенные решения рассматривать для нового поколения дождевальных машин кругового действия некорректно.

Энергосбережение насосных установок систем мелиорации и орошения рассматривается в работах профессора С.В. Оськина [204–207, 215, 350, 351]. В них представлена научная новизна зависимости параметров регулируемого электропривода насоса от энергопотребления, которая оценивается коэффициентом полезного действия насосного агрегата (рисунок 1.19):

$$\eta_{ар} = \frac{[-0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383](1-s)[\eta_{\max} A_{\alpha} B_q] \{k_v [\alpha^* (1,25f^* - 0,25)]^2 + H_{cr}^*\}}{\left[1 + \frac{r'_2(r_1 + r_0)}{r_0^2 s} - \frac{2r_1}{r_0} + \frac{r_1 s}{r'_2} + \frac{r'_2 r_1}{4\pi^2 (f^*)^2 f_i^2 L^2 s}\right] \{(1 - H_{no}^*) [\alpha^* (1,25f^* - 0,25)]^2 + H_{no}^*\}}, \quad (1.7)$$

где f^* – относительное изменение частоты тока; s – скольжение электродвигателя; α^* – относительное изменение угла поворота лопастей насоса; r_1, r'_2, r_0 – сопротивления соответственно статора, приведенное ротора и цепи намагничивания, Ом; $\eta_{\max} A_{\alpha} B_q$ – параметры турбомеханизма насоса, зависящие от его КПД, изме-

нения частоты тока и угла поворота, а также от изменения текущей производительности насоса; L – индуктивность обмотки статора, Гн; $H_{ст}^*$ – относительный статический напор; $H_{по}^*$ – относительный скоростной напор; k_v – коэффициент, учитывающий относительность статического и скоростного напоров.

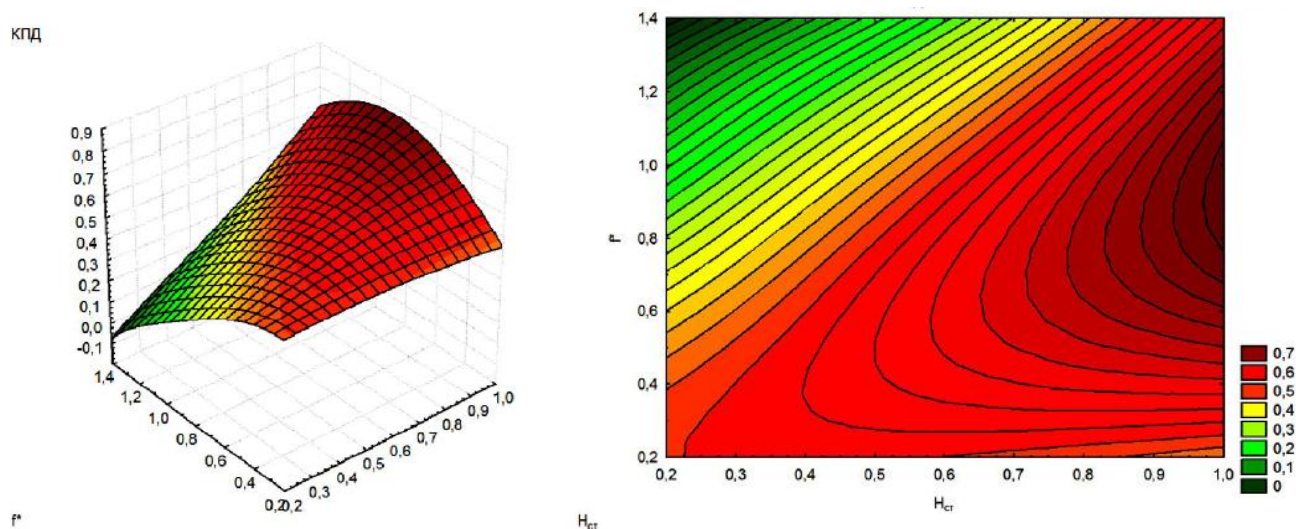


Рисунок 1.19 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (векторное управление) и относительного статического напора (авт. С.В. Оськин и В.А. Дидыч)

КПД насосного оборудования, как показано в работах профессора С.В. Оськина, зависит от частоты тока электродвигателя, регулируя которую, можно добиться экономии электроэнергии при выполнении требований к водоподаче. Данные результаты следует учитывать при рассмотрении энергоэффективности водоподачи и полива в целом. Для водораспределения дождевальными машинами кругового действия данные исследования принимаются как ограничения, так как для работы ДМ требуется создание давления на гидранте в строго заданных пределах [231].

Основным потребителем энергии водораспределения является привод опорных тележек секций дождевальной машины. Повышению эффективности работы привода посвящены труды в направлениях снижения потерь энергии при передаче, обоснования выбора привода для конкретных условий эксплуатации, повышения надежности, производительности и КПД привода и т. п. Эти направления рассматриваются в научных трудах профессоров Г.П. Ерошенко, М.А. Таранова, С.В. Оськина, С.К. Шерязова.

В работе профессора С.В. Оськина [204] раскрыта взаимосвязь показателей надежности с энергопотреблением. При низких показателях надежности электрооборудования происходит завышенное энергопотребление. Для ремонтпригодного оборудования, а именно для электроприводов, эта взаимосвязь описывается коэффициентом готовности:

$$k_r = \frac{1}{1 + \frac{\sum \lambda_{\text{дв}я}}{\mu_{\text{дв}я}} + \frac{\sum \lambda_{\text{дв}с}}{\mu_c} + \frac{\sum \lambda_{\text{ау}я}}{\mu_{\text{ау}я}} + \frac{\sum \lambda_{\text{ау}с}}{\mu_c}}, \quad (1.8)$$

где $\lambda_{\text{дв}я}$, $\lambda_{\text{дв}с}$ – интенсивности отказов, соответственно, явные и скрытые в электродвигателе, ч^{-1} ; $\lambda_{\text{ау}я}$, $\lambda_{\text{ау}с}$ – соответственно явные и скрытые интенсивности отказов аппаратуры управления, ч^{-1} ; $\mu_{\text{дв}я}$, $\mu_{\text{ау}я}$, μ_c – интенсивности восстановления соответственно при явных отказах электродвигателя и аппаратуры управления и при скрытых отказах электропривода, ч^{-1} .

Для электрифицированных дождевальных машин отказавший электродвигатель сразу меняют на новый, чтобы не останавливать процесс полива. Отказавший электродвигатель ремонтируют в специализированных ремонтных мастерских (сервисных центрах) по договору, так как в хозяйствах в большинстве случаев собственные ремонтные мастерские не оснащены специальным оборудованием. Стоимость ремонта в сервисных центрах может быть сопоставима со стоимостью нового оборудования и тогда ремонт делать нецелесообразно. Поэтому надежность электропривода для дождевальных машин можно описывать показателями безотказности (интенсивностью отказов, наработкой на отказ, вероятностью отказов и т. п.).

Энергоснабжение дождевальных машин осуществляется от разных источников (например, переносных генераторов). При выборе типа привода и, соответственно, источника его питания необходимо учитывать стоимость первичного ресурса, так как в последствии на ее основе формируются эксплуатационные затраты ДМ. В работах профессора С.К. Шерязова [310, 311] описывается подход к оценке стоимости тепловой энергии, основанный на расчете *LCOE* (показатель нормированной стоимости энергии):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + OM_t + F_t}{(1 + DR)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1 + DR)^t}}, \quad (1.9)$$

где I_t – инвестиционные расходы за год t ; OM_t – операции и расходы на техническое обслуживание в году t ; F_t – расходы на топливо в год t ; E_t – производство электроэнергии в год t ; DR – ставка дисконтирования; n – экономический срок службы электростанции.

Приводится сравнительное графическое описание исследований (рисунок 1.20).

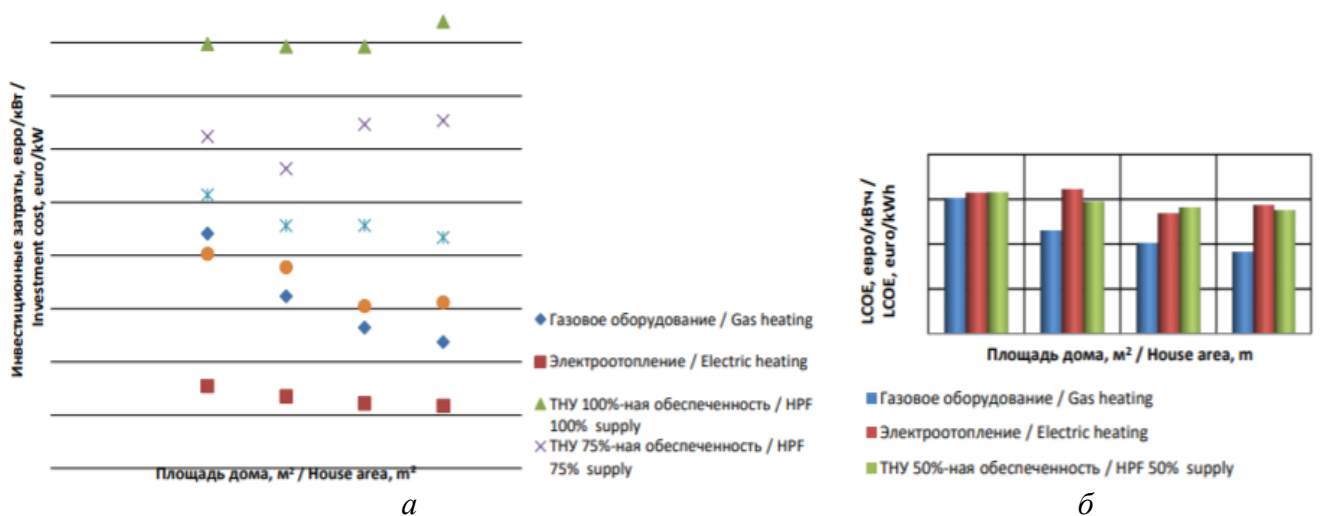


Рисунок 1.20 – Усредненные затраты на систему отопления (а) и усредненная стоимость производства тепловой энергии (б), евро/кВт·ч (авт. С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина, Н.С. Низамутдинова)

Представленный подход профессора С.К. Шерьязова можно принять за основу при расчетах стоимости произведенной энергии переносным генератором для водораспределения дождевальных машин. Однако для выбора источника показателя (1.9) недостаточно, так как в нем не учитываются показатели надежности и взаимосвязь с параметрами электропривода. Поэтому требуется рассмотреть показатели дождевальной машины для системы энергоснабжения, а не только для источника.

Научная новизна новых технических энергоэффективных решений подтверждена в свидетельствах интеллектуальной собственности, патентах. Известны патенты [210, 212–215, 362, 363], в которых отдельные части ДМ (например,

опорная тележка), узел (например, способ крепления шпренгельной фермы) или система автоматического управления усовершенствованы и оптимизированы.

Эффективную систему управления с помощью GLONASS-спутник предлагают ученые во главе с профессором В.Н. Карповым (патент № 2522526 [213]), в которой процесс полива многоопорными дождевальными машинами фронтального действия выполняется с регулированием угловой скорости электропривода по данным датчиков влажности конкретного поливного участка (рисунки 1.21 и 1.22).

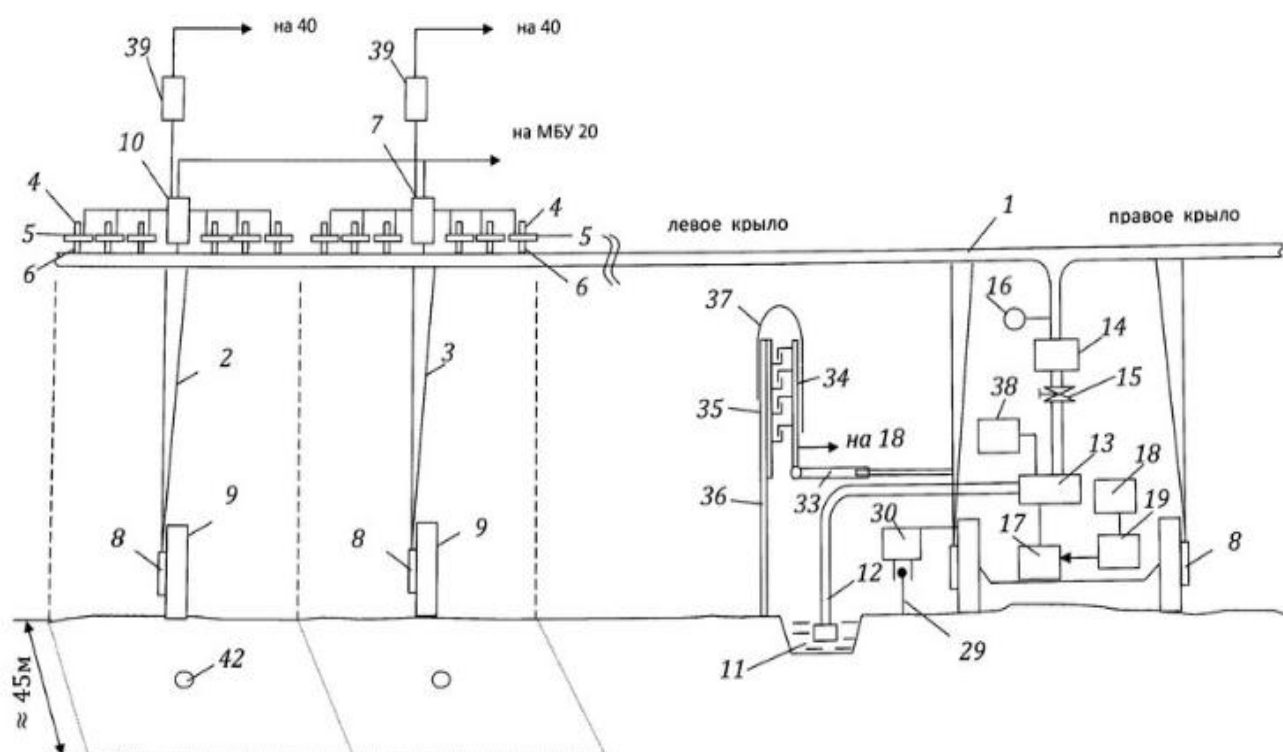


Рисунок 1.21 – Функциональная схема устройства автоматизированного управления многоопорной дождевальной машиной фронтального действия для точного полива (авт. В.Н. Карпов и др., ФГБОУ ВПО «СПбГАУ»): 1 – трубопровод; 2 и 3 – ведущая и промежуточные опорные тележки; 4 – дождевальные насадки; 5 – электроуправляемые клапаны; 6 – патрубки; 7 и 10 – ведущая и промежуточная ПСЛ; 8 – электропривод; 9 – колесо; 11 – оросительный канал; 12 – водозаборное устройство; 13 – насос; 14 – расходомер; 15 – электрогидроздвижка; 16 – манометр; 17 – электродвигатель насоса; 18 – щит управления; 19 – пульт управления; 29 – направляющий трос; 30 – устройство стабилизации курса; 34 – токосъемник; 35 – контактная сеть; 36 – стойки; 37 – кожух; 38 – вакуум-насос; 39 – выходы блока управления поливом; 40 – блок анализа сигналов; 42 – измеритель влажности

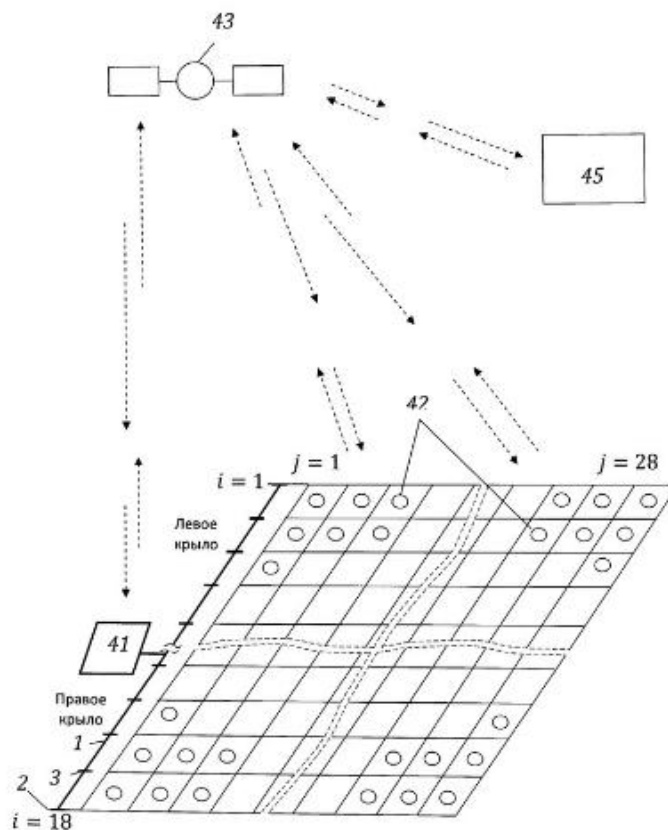


Рисунок 1.22 – Функциональная схема передачи сигналов от измерителей влажности через спутниковую связь на дождевальную машину (авт. В.Н. Карпов и др., ФГБОУ ВПО «СПбГАУ»): 41 – GLONASS-приемник; 43 – GLONASS-спутник; 45 – система управления поливом; i и j – размеры квадратов поливного участка

Данная система управления в первую очередь направлена на повышение производительности и качества полива. При этом регулируемый электропривод позволяет адаптироваться под рельеф поливной площади. Для машин кругового действия данная система потребует существенной доработки, так как распределение поливной воды выполняется по кругу, и задавать алгоритм регулирования скорости электропривода требуется с учетом параметров дождеобразующих устройств.

Другие изобретения эффективных дождевальных машин относятся к машинам на гидроприводе [210, 212]. Авторы во главе с профессором А.И. Рязанцевым (ФГБОУ ВО Рязанского ГАТУ имени П.А. Костычева) и авторы во главе с И.А. Шушпановым (ФГБНУ «ВолжНИИГиМ») предлагают регулируемый гидропривод для повышения производительности работы таких машин. При том же энергопотреблении увеличивается качество полива.

Зарубежные изобретения энергоэффективных дождевальных машин кругового действия описаны в [362, 363]. В работе американских ученых Richard W. Parod, Elkorn, NE (US); Charles H. Mels, Albion, NE (US) (Linsday Corporation, Omaha, NE (US)) [362] представлена энергоэффективная дождевальная машина с аккумуляторным источником питания и солнечными батареями Solar Powered Irrigation Machine, в которой питание электродвигателя опорной тележки происходит от солнечной панели и аккумуляторной батареи через инвертор (рисунок 1.23).

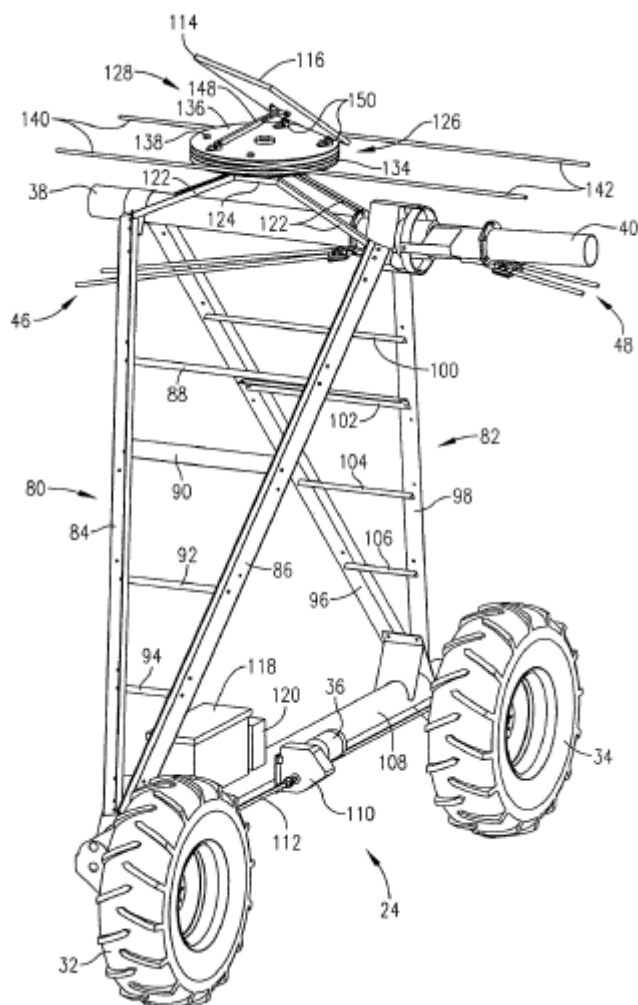


Рисунок 1.23 – Опорная тележка дождевальной машины с аккумуляторным источником питания и солнечной панелью (авт. Richard W. Parod, Elkorn, NE (US); Charles H. Mels, Albion, NE (US)): 24 – опорная тележка; 32 и 34 – колеса; 36 – электродвигатель переменного тока; 38 и 40 – трубопровод; 46 и 48 – шпренгельные фермы; 80 и 82 – угловые скобы; 84 и 86 – опорные элементы; 88, 90, 92, 94, 100, 102, 104 и 106 – поперечины; 96 и 98 – опорные элементы; 108 – рама опорной тележки; 110 – передача; 112 – приводной вал; 114 – солнечная панель; 116 – собирающая поверхность; 118 – аккумуляторная батарея; 120 – инвертор; 122 – подъемный упор; 124 – горизонтальная платформа; 126 – узел вращения; 128 – система управления; 134 и 136 – верхний и нижний шкивы; 140 и 142 – кабели; 148 – распорка; 150 – петли

Данный способ питания дождевальной машины повышает энергетическую эффективность полива дождевальной машиной за счет исключения затрат на водораспределение при использовании возобновляемых источников энергии. Опираясь на таблицу 1.19, использование аккумуляторного источника питания, оснащенного солнечными панелями, позволяет экономить энергию на преобразование в электроприводе опорных тележек. Однако к такому способу питания выдвигается ряд требований по обеспечению продолжительности работы ДМ для выполнения поливной нормы, что необходимо исследовать.

Таким образом, повышению энергетической эффективности полива посвящено множество работ [2, 52, 107, 120, 122, 125, 126, 144, 145, 170, 210, 212–215, 236, 239, 240, 256, 257, 259, 270–272, 276, 288, 293, 294, 304, 309, 313, 320, 321, 350, 351, 362, 363], но в них указаны решения лишь частных задач, например, только оценки энергетической эффективности процесса или повышения качества полива, или повышения надежности работы оборудования, или приводится оценка энергетической эффективности различных систем энергоснабжения. Однако глубоко не раскрываются вопросы разности энергопотребления дождевальных машин кругового действия с различными системами энергоснабжения, а также в каких условиях эксплуатировать ДМ кругового действия с электроприводом, гидроприводом, механическим приводом.

На основе вышеизложенного существенного снижения энергопотребления при эксплуатации дождевальных машин можно добиться решением не частных задач повышения надежности, производительности и т. д., а комплексным подходом к выбору системы энергоснабжения дождевальной машины кругового действия для конкретных условий эксплуатации. При этом также необходимо учитывать основные параметры дождевальной машины, исходные данные производственного поливного участка и биологическое звено (выращиваемую культуру).

1.6 Постановка научной проблемы и задач исследования

Анализ научных источников по мелиорации, нормативных документов и справочников, информации заводов-изготовителей современных широкозахватных низконапорных дождевальных машин и данных практического опыта показал, что полив для растениеводства играет первоочередную роль. Это доказывается существенным (в 1,6–6,2 раза) приростом урожая различных культур, возделываемых на сухих и очень сухих землях.

Итоги пленарного заседания Всероссийского форума сельхозпроизводителей (март 2018 г., г. Краснодар) о востребованности и конкурентоспособности зерна, о перспективах развития производства и технологий высокобелковых культур ориентируют сельхозпроизводителей на стабильно развивающийся зерновой рынок. В стратегии развития растениеводства большое внимание уделено мелиорации, подтверждением чего является реализация программы поддержки сельхозпроизводителей при покупке и строительстве оросительных систем.

Неизбежные климатические изменения за последние 50 лет стали причиной увеличения на 14 % площади сухих и очень сухих земель. Это приводит к снижению и даже потере плодородия почвы. Поэтому для некоторых земель реконструкция, совершенствование и строительство оросительных систем становятся жизненно необходимыми.

Из всех способов полива, применяемых в растениеводстве, полив дождеванием является самым распространенным, несмотря даже на то, что капельный полив является ресурсосберегающим. Дождевальные машины и установки представляют собой мобильную технику и могут работать совместно с тракторной сельскохозяйственной техникой на орошаемой площади. История развития дождевальной техники насчитывает четыре поколения, от самой простой громоздкой энергоемкой установки ДДН-70 до роботизированного оросительного комплекса.

В настоящее время вырос спрос на широкозахватные низконапорные дождевальные машины, лидирующие позиции которых занимают машины кругового действия. По сравнению с фронтальными движение круговых машин легче организовать и контролировать, так как их одна сторона является неподвижной опорой, вокруг которой происходит движение по кругу. Как показывают данные ис-

следований, около 52 % ДМКД используют с электрическим приводом, а 39 % – с гидравлическим.

В различных регионах РФ принимают и реализовывают программы развития мелиорации. Активно разрабатывают проекты восстановления систем орошения, строят новые системы в Воронежской, Ростовской, Волгоградской, Липецкой, Пензенской, Саратовской и других областях. В перспективе до 2024 г. в эксплуатацию будут введены оросительные сети на общей площади около 600 тыс. га. Ожидаемый спрос на ДМ в России составит около 2500 ед., а для Саратовской области – около 350 ед.

Исходя из практического опыта и данных заводов-изготовителей об эксплуатации дождевальных машин кругового действия, можно выделить около 40 способов энергоснабжения ДМ. Такое разнообразие вариантов подразумевает использование одного из двух приводов (электрического или гидравлического), какого-либо из 10 вариантов источников энергии (кабельной линии, дизельного генератора, бензинового генератора, гидрогенератора и т. п.) и определенной системы передачи энергии (кабельная линия или трубопровод с рабочей жидкостью).

Варианты систем энергоснабжения ДМ имеют различные уровни потребления энергии. Анализ энергопотребления показал разницу в 1,5–4,2 раза. По предварительной оценке, это связано с видом преобразования энергии на различных этапах работы системы энергоснабжения ДМ, а также с условиями эксплуатации дождевальной машины. Однако, как показала практика, в одинаковых условиях эксплуатации используют ДМ с различными системами энергоснабжения.

Снижение энергопотребления путем рационального выбора системы энергоснабжения, а также оптимизации параметров ДМ позволит экономить только с одной машины около 223,48 тыс. руб. в год. Для Саратовской области экономия составит около 10,7 млн руб., а для РФ в целом – около 55,8 млн руб.

Анализ научно-технической литературы и результатов исследований таких ученых, как В.Г. Дегтярев, Б.М. Лебедев, Н.Ф. Рыжко, А.И. Есин, Д.А. Соловьев, Л.В. Кравченко, А.Е. Хаджиди, Л.А. Журавлева, А.И. Рязанцев и др., внесших значительный вклад в развитие дождевальной техники и мелиорации в целом, и таких, как И.Г. Стрижков, В.Н. Карпов, З.Ш. Юлдашев, В.Г. Сазыкин, В.И. Чарыков, Г.П. Ерошенко, С.В. Оськин, Н.П. Кондратьева, М.А. Таранов,

С.К. Шерьязов, В.А. Буторин, В.Г. Петько, А.В. Линенко, С.А. Кешуов и др., внесших значительный вклад в расширение области применения электроэнергии и эксплуатации электропривода в сельском хозяйстве, показал высокий уровень разработанности данных тем. Однако несмотря на глубину их охвата, вопрос выбора оптимальной системы энергоснабжения ДМ и разработки комплекса способов и средств повышения энергетической эффективности дождевальных машин кругового действия остается нерешенным.

Дождевальные машины кругового действия, выполняя агротехнические требования к поливу, потребляют различное количество энергии. В структуре энергопотребления 26–78 % занимают потери энергии на разных этапах преобразования и транспортирования. Как показывают исследования, это зависит не только от вида энергии, типа источника, оборудования и сетей питания и управления, но и от условий эксплуатации дождевальной машины. У сельскохозяйственных товаропроизводителей возникает потребность выбора дождевальной машины с оптимальной системой энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации. При этом производители дождевальной техники, имея предложения различных модификаций ДМ кругового действия с системами на электрическом, гидравлическом и механическом приводах, не учитывают условий эксплуатации ДМ и не могут удовлетворить возникшей потребности сельскохозяйственных товаропроизводителей из-за того, что не известно, какие показатели условий эксплуатации необходимо учитывать, а также каковы пути реализации их учета. Накопленные теоретические знания и практический опыт по эксплуатации дождевальных машин кругового действия не позволяют определить оптимальную систему энергоснабжения ДМ по критерию минимума энергопотребления (или эксплуатационных затрат) в конкретных условиях эксплуатации поливного участка.

Научная проблема состоит в том, что номенклатура выпускаемых ДМ и перечень предоставляемых производителем и определяющих свойства изделий технических характеристик позволяет потребителю выбирать и эксплуатировать энергооборудование и решать задачи искусственного орошения при возделывании зернобобовых, кормовых культур, однако улучшению показателей систем и достижению максимальной результативности использования ресурсов препятствует отсутствие обобщенной совокупности научно обоснованных критериев, по-

звolyающей при сравнении и выборе оборудования в комплексе учесть географические, природно-климатические, технические, технологические, эксплуатационные требования, показатели, характеристики объектов и изделий, определить обобщенную энергоэффективную систему и обеспечить энергосбережение при эксплуатации ДМ кругового действия.

На основе поставленной научной проблемы сформулированы цель и задачи исследования.

Цель работы – снизить энергопотребление дождевальных машин кругового действия за счет обоснования выбора оптимальной системы энергоснабжения, совершенствования способов и средств энергосбережения.

Задачи исследований:

1. Выполнить анализ номенклатуры, характеристик и условий эксплуатации дождевальных машин кругового действия и определить подходы к улучшению показателей энергоэффективности для достижения энергосбережения в технологиях искусственного орошения.

2. Исследовать факторы, влияющие на энергопотребление полива дождевальными машинами кругового действия и синтезировать функционально-структурные модели их энергоснабжения.

3. Установить зависимость эффективности энергоснабжения дождевальной машины от условий эксплуатации, разработать обобщающий критерий и алгоритм определения оптимального энергоснабжения, а также обосновать границы, зоны и условия применения различных вариантов энергоснабжения.

4. Разработать способы и технические средства повышения энергетической эффективности электрифицированных дождевальных машин кругового действия.

5. Провести экспериментальные исследования рабочих процессов аккумуляторного источника питания и оценить влияние значимых факторов на продолжительность движения дождевальной машины, а также разработать и исследовать устройство динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей с источником питания дождевальных машин на переменном токе.

6. Выполнить полевые испытания, производственную проверку полученных результатов исследования и оценить их экономическую эффективность.

2 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

2.1 Обоснование цели и границ изучаемой системы

Формулировка цели является важным этапом работы, так как ее точное изложение позволяет достичь конкретных результатов. Цель данной работы – повысить энергетическую эффективность дождевальных машин кругового действия за счет обоснования выбора оптимальной системы, совершенствования способов и средств энергоснабжения. Цель характеризуется пространственно-временными границами действия изучаемой системы [26, 51, 99, 118, 119, 127]. Рассматриваемую систему в границах действия представляют в виде объекта исследования, эксплуатируемого в определенных условиях.

Система энергоснабжения дождевальных машин кругового действия обеспечивает распределение воды равномерным слоем по поливной площади. Количество распределенной воды зависит от выращиваемой культуры, параметров дождевальной машины, а также от условий окружающей среды (скорости ветра, температуры и влажности воздуха). Вместе с этим почва как входной параметр характеризуется качественными и количественными характеристиками. В работах [120, 125, 126, 145, 187, 256, 257, 261, 262, 263] приведены различные параметры, относительно которых уточняют необходимое количество воды, но укрупненным понятием принято считать поливную норму $m_{\text{пн}}$ (л/га; м³/га) для конкретной культуры [262, 263]. Площадью полива S (га), охватываемой дождевальной машиной, определяются общий объем воды, а также необходимая подача (или расход) насоса Q (л/с или м³/ч):

$$Q = qS, \quad (2.1)$$

где q – гидромодуль дождевальной машины, л/с/га или м³/ч/га.

С учетом этого совершенно точно можно принять площадь полива и поливную норму как параметры, определяющие границы рассматриваемой системы энергоснабжения.

Временные границы системы представлены микроциклами, макроциклами и жизненным циклом системы. Микроцикл – период работы системы на небольшом промежутке времени с повторяющимися действиями. Например, период полива за один проход дождевальная машины, т. е. минимальное количество времени t_0 (ч), за которое удастся увлажнить площадь S при поливной норме $m_{\text{пн}}$. Данный период зависит от скорости перемещения опорных тележек ДМ. Как известно из курса физики [83, 284, 324], скорость определяет мощность машины. Микроциклом системы является период времени, за который выполняется один полив и который определяет величину установленной мощности на движение опорных тележек ДМ.

Макроцикл системы – период времени, в котором повторяются резкие изменения воздействий окружающей среды или других факторов. Таким циклом можно назвать сезонность использования системы. Например, в летний период систему используют по назначению, а в зимний период она находится на хранении. Макроциклом ДМ можно принять период сезонности $t_{\text{сез}}$ (мес.) – продолжительность поливного сезона выращиваемых культурных растений. Период сезонности $t_{\text{сез}}$ определяет общие годовые эксплуатационные и энергетические затраты, затраты труда на монтаж и обслуживание ДМ.

Жизненным циклом (ЖЦ) системы является промежуток времени от момента проектирования системы до момента её утилизации [45, 109, 118, 119] (рис. 2.1).

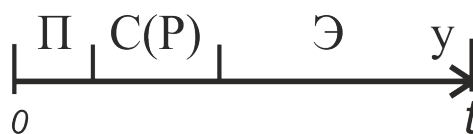


Рисунок 2.1 – Жизненный цикл системы: П – проектирование; С(Р) – создание (разработка); Э – эксплуатация; у – утилизация

В состав жизненного цикла входят стадии проектирования, создания и эксплуатации. Производственной частью ЖЦ является срок службы, который входит в стадию эксплуатации. Сроком службы определяется эффективность системы – максимально возможный период времени $t_{\text{ср}}$ (лет), в течение которого систему используют по назначению. Продолжительность срока службы зависит от качества проекта и монтажа (создания), конструктивной надежности оборудования, а также от его технической эксплуатации. Окончательным моментом использования

системы является такое состояние ДМ, когда износ и старение базовых элементов невозможно восстановить, применяя текущие и капитальные ремонты, до требуемого уровня надежности системы.

Таким образом, принципы совершенствования способов снижения энергопотребления должны охватывать применение ДМ на площади полива $0 < S < S_{\max}$ с поливной нормой $0 < m_{\text{пн}} < m_{\text{пн-макс}}$. При этом эффект повышения энергоэффективности должен проявляться на всех стадиях производственной эксплуатации: при единовременном поливе $t_o \leq t_{o-\max}$; при сезонном использовании $t_{\text{сез}} \leq t_{\text{сез-макс}}$ и на всем сроке эксплуатации $t_{\text{ср}} \leq t_{\text{ср-макс}}$. Из опыта применения ДМ [59, 105, 122, 147–152, 178, 180, 188, 200, 224, 231, 233, 234–236, 239, 240, 255–257, 259, 293, 294, 309, 320, 358] известны следующие пространственно-временные границы: $S_{\max} = 358,2$ га; $m_{\text{пн-макс}} = 600$ м³/га; $t_{o-\max} = 225$ ч; $t_{\text{сез-макс}} = 6$ мес.; $t_{\text{ср-макс}} = 25$ лет.

Для закрепления временных и пространственных границ необходимо выделить объект исследования.

Дождевальная машина кругового действия – это специальная сельскохозяйственная машина, используемая для полива дождеванием пахотных земель. Общей целью данной машины является распределение поливной воды в виде дождя. ДМ представляет собой металлическую конструкцию, состоящую из водораспределительного трубопровода и опорных тележек, которые способствуют перемещению трубопровода.

Рабочий процесс полива зависит от особенностей ДМ. Например, ДМ кругового действия [104, 105, 231, 239] в простейшем представлении работает следующим образом. С помощью закрытой оросительной сети (водоподводящий трубопровод расположен под землей на глубине 0,5–1,0 м) подводят воду к неподвижной опоре к жестко закрепленному гидранту ДМ. По водораспределительному трубопроводу вода подается к дождевателям и далее к корневой системе растений. Перемещение трубопровода по кругу осуществляется по секциям за счет перемещения опорных тележек, на которых установлены приводы. Движение ДМ выполняется путем передачи момента вращения колесам с пневматическими шинами (в качестве движителей могут быть использованы колеса жесткой конструкции, гусеницы, шаговые стопы и т. п.) различными способами (см. главу 1).

Вода в трубопровод подается под давлением от центра к периферии во все дождеватели. Совершая один полный оборот по кругу, ДМ обеспечивает полив всех растений на площади действия.

Выделение объекта исследования – это такой прием, в результате которого область материального мира разделяется на две части. Одну рассматривают как объект исследования, а другую – как внешнюю среду.

С другой стороны, для выделения объекта исследования необходимо определить все элементы, от которых зависит достижение цели. В нашем случае это элементы водоподачи и водораспределения, элементы энергооборудования, трудовые ресурсы.

Согласно рекомендациям [118, 119], ДМ можно считать производственной системой, которая создается и функционирует с целью подачи воды для культурных растений.

Производственная система полива дождеванием показана на рисунке 2.2.

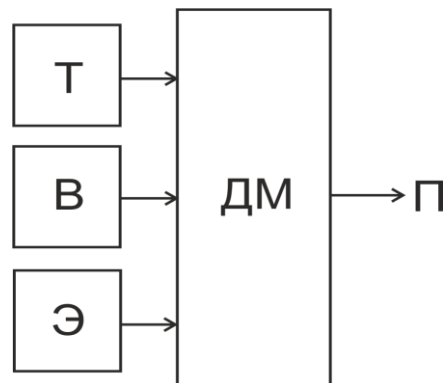


Рисунок 2.2 – Производственная система полива дождеванием:
Т – трудовые ресурсы, необходимые для монтажа, демонтажа, технического обслуживания, наладки и т. п.; В – водоподача;
Э – энергетические ресурсы и оборудование; ДМ – дождевальная машина; П – полив (поливная норма)

Как видно из рисунка 2.2, в производственную систему входят три вида ресурсов для дождевальной машины: трудовые, энергетические и водные. Результатом функционирования объекта является поливная вода, распределенная по площади полива. Водный ресурс определяется водоподачей ДМ. Водоподачу рассчитывают по поливной норме. К ней выдвигают ряд требований по созданию входного давления воды в трубопроводе, объема, скорости подачи и т. п. Распределению поданной воды по площади способствуют энергетические ресурсы. Об-

служивание ДМ и контроль за ее нормальной работой осуществляют трудовые ресурсы.

От водоподачи зависят режим работы ДМ и, соответственно, качество полива. В эти характеристики входят удаленность поливной площади от водоема, диаметр подведенного трубопровода, мощность насоса (насосной станции) и создаваемого им давления воды, возможность управления насосом и т. п. Таким образом, водный ресурс обеспечивает возможную площадь полива.

Трудовые ресурсы обеспечивают организацию эксплуатации всего процесса полива. Эти ресурсы характеризуются трудозатратами организации работы персонала, доставкой запасных частей и ремонтной базой, квалификацией персонала и т. п. Трудовые ресурсы определяют возможность нормальной работы ДМ, т. е. ее надежность и в целом нормальное выполнение всего процесса.

Энергетические ресурсы необходимы для того, чтобы обеспечить перемещение ДМ и распределение воды по поливной площади. Энергоснабжение ДМ характеризуется мощностью и видом источника энергии, комплектом оборудования, сетью передачи энергии и системой управления.

Из производственной системы (см. рисунок 2.2) видно, что при обеспечении водоподачи в необходимом количестве и требуемых параметров давления и объема поливной воды, а также необходимого контроля и обслуживания, качество полива (коэффициент эффективного полива) [263] определяется параметрами распределения поливной воды, т. е. параметрами энергоснабжения ДМ. Результат работы ДМ достигается благодаря эффективному распределению воды, т. е. системе энергоснабжения.

Итак, на эффективность всего полива влияет качество всех видов ресурсов, а на эффективность дождевальную машины – ее энергоснабжение.

Каждый выделенный элемент производственной системы содержит свои функциональные звенья. Рассмотрим только энергоснабжение ДМ (рисунок 2.3). Эта система должна учитывать источник энергии, устройство присоединения к источнику, приемники энергии, контрольную и пуско-защитную аппаратуру, а также ее сеть, устройство передачи энергии от приемника к движителю опорных тележек.

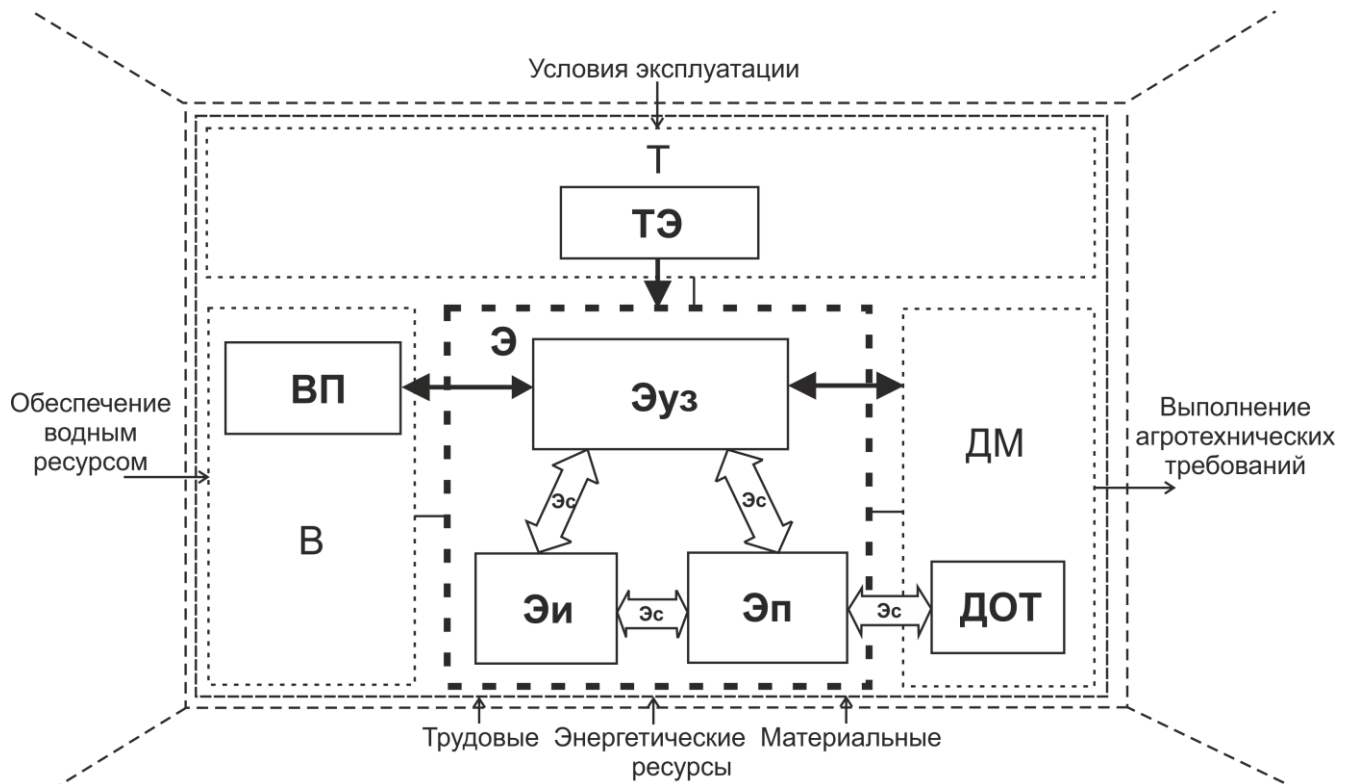


Рисунок 2.3 – Объект исследования – система энергоснабжения дождевальной машины кругового действия (В – водный ресурс, Э – энергооборудование, ТЭ – техническая эксплуатация, ВП – водоподача, Э_{уз} – оборудование управления и защиты, Э_и – источник энергии, Э_п – приемник энергии, Э_с – устройства передачи энергии (сеть), ДОТ – двигатели опорных тележек дождевальной машины)

Система энергоснабжения имеет свой жизненный цикл [45, 118, 274], который рассчитывают от стадии проектирования машины до стадии снятия ее с эксплуатации. Проектирование ведут по основным технологическим параметрам. Отдельные конструктивные элементы машины (водопроводящий трубопровод, опоры, фермы и другие конструкции) в проекте разрабатывают раньше, чем оборудование системы энергоснабжения, т. е. с небольшим отставанием.

Для дождевальной машины выбор оптимальной системы энергоснабжения сводится к определению варианта, при котором может быть достигнута эффективность полива с наименьшими энергопотреблением и эксплуатационными затратами.

Видами энергии Э_и являются: энергия потока поливной воды, механическая энергия вращения от двигателя внутреннего сгорания, электрическая энергия [172, 178, 185, 187, 189, 203]. К источнику выдвигается ряд требований, связанных с параметрами машины и полива. В первую очередь это обеспечение запасом мощности на перемещение опорных тележек ДМ, затем обеспечение надежности

подачи и качества энергии. Вместе с этими параметрами для источника важную роль играют приемники энергии и сеть.

Приемник энергии \mathcal{E}_Π – оборудование, которое преобразует энергию источника в энергию принимаемой движителями опорной тележки машины или транспортирования ее дальше. В качестве приемника энергии выступает электрический, гидравлический или механический привод. Выбор привода основан на том, какой источник энергии используется. Преобразование энергии в приводе связано с ее потерями, поэтому одним из самых важных его параметров является коэффициент полезного действия (КПД) η (%). Также важными характеристиками привода являются конструктивная и эксплуатационная надежность, способность к изменению режимов работы и загрузки, возможность регулирования и управления приводом.

Технологический процесс полива предусматривает движение по кругу в нормальном режиме. Однако в силу действия различных факторов возникают переходные и аварийные режимы, которые могут повлиять на исправность источника и приемника, а также машины в целом. Для таких случаев предусмотрена система контроля, защиты и управления $\mathcal{E}_{УЗ}$. К оборудованию такой системы выдвигают требования по уровню регулирования защиты и управления, точности данных, надежности и т. п. Также функционал $\mathcal{E}_{УЗ}$ должен быть согласован с другими частями производственной системы, поскольку неисправности водоподдачи или конструкции должны ограничивать работу энергооборудования, чтобы не допустить отказ ДМ.

Для передачи энергии используют сеть $\mathcal{E}_С$. Как правило, сеть, в которой осуществляется передача основной мощности, называется силовой, а данные для управления и контроля – сетью управления. Конфигурация сети зависит от вида энергии и характеризуется также КПД η (%).

Таким образом, исследование системы энергоснабжения ДМ основано на следующих принципах:

- временными границами цели являются микроцикл – продолжительность одного оборота ДМ t_o (ч), макроцикл – продолжительность использования ДМ в течение года $t_{сез}$ (мес.), срок службы $t_{сж}$ (лет);

- пространственными границами цели являются площадь полива S (га), поливная норма для конкретной культуры $m_{\text{пн}}$ (л/га; м³/га) и их максимальные значения $S_{\text{max}} = 358,2$ га; $m_{\text{пн-max}} = 600$ м³/га;
- объектом изучения является система энергоснабжения ДМ, в которую входят источник, приемник энергии, оборудование управления и защиты, а также силовая и вторичная сети;
- смежный процесс формирования необходимых эксплуатационных свойств делится на этапы создания, комплектования и эксплуатации;
- выделенные этапы отличаются природой факторов и возможностью управления ими.

2.2 Разработка классификации учитываемых факторов

Возможность достижения поставленной цели зависит от многих причин. Основные из них, которые связаны с энергоснабжением, назовем факторами. Классификация факторов позволяет более полно охарактеризовать работу объекта в конкретных условиях эксплуатации.

Множество факторов можно разделить на внутренние, которые относятся к оборудованию, и внешние, которые действуют на его работу со стороны окружающей среды или технологического процесса. Согласно [40, 118, 119, 274], внутренние факторы называют эксплуатационными свойствами, а внешние – условиями эксплуатации.

Эксплуатационные свойства объекта исследования:

- свойства энергопреобразования (КПД);
- эксплуатационная надежность (вероятность безотказной работы, интенсивность отказа и т. п.);
- технико-экономические показатели (мощность, номинальные параметры, габаритные размеры, стоимость, эксплуатационные затраты).

Условия эксплуатации:

- уровень и характер нагрузки;
- дестабилизирующие воздействия (влажность, уровень вибрации, условия пуска, условия хранения);
- уровень технического обслуживания и ремонта;
- надежность и качество водоподдачи;
- аварийные режимы работы.

На этапе комплектования системы энергоснабжения классификацию факторов рассматривают с общих позиций, так как не учитывают индивидуальные особенности работы оборудования (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Классификация учитываемых факторов системы энергоснабжения

| Часть объекта | Эксплуатационные свойства | | Условия эксплуатации | |
|---------------------|---|--------------------------|--|----------------------------------|
| | наименование | обозначение, ед. изм. | наименование | обозначение, ед. изм. |
| Источник энергии | мощность | P , кВт | площадь полива | S , га |
| | КПД | η , % | режим работы | ПВ, % |
| | типоразмер | ТП | температура окру- жающей среды | t , °C |
| | номинальные парамет- ры | $V_{П}$ | | влажность окру- жающей среды |
| | исполнение по защи- щенности | IP | характер нагрузки | β , % |
| | срок службы | T , ч | занятость в течение суток и года | $T_{Г(сут)}$, ч |
| | вероятность безотказ- ной работы, | $P(t)$ | | наличие контроля и управления |
| | характеристики внут- ренней защиты, | СЗ | параметры силовых и вторичных сетей | ν_c |
| | затраты на приобрете- ние и монтаж | C , руб. | | |
| | затраты на техниче- ское обслуживание и ремонт, | $Z_{ТОР}$, руб. | | |
| | технологический ущерб из-за отказа | $У$, руб. | | |

| Часть объекта | Эксплуатационные свойства | | Условия эксплуатации | |
|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| | наименование | обозначение, ед. изм. | наименование | обозначение, ед. изм. |
| Приемник энергии | мощность | P , кВт | режим работы | ПВ, % |
| | КПД | η , % | загрузка | γ , % |
| | типоразмер | ТП | температура окружающей среды | t , °С |
| | номинальные параметры | $V_{\text{П}}$ | влажность окружающей среды | φ , % |
| | исполнение по защищенности | IP | характер нагрузки | β , % |
| | | | уровень вибрации | δ , мкм |
| | срок службы | T , ч | занятость в течение суток и года | $T_{\text{Г(сут.)}}$, ч |
| | вероятность безотказной работы | $P(t)$ | уровень контроля и управления | $\nu_{\text{уз}}$ |
| | характеристики внутренней защиты | СЗ | параметры источника энергии | $\nu_{\text{и}}$ |
| | затраты на приобретение и монтаж | С, руб. | | |
| | затраты на техническое обслуживание и ремонт | $Z_{\text{ТОР}}$, руб. | | |
| | технологический ущерб из-за отказа | У, руб. | | |
| Оборудование управления и защиты | мощность | P , кВт | режим работы | ПВ, % |
| | диапазон регулирования | ДР | температура окружающей среды | t , °С |
| | погрешность измерений | Δ | уровень вибрации | δ , мкм |
| | | | требования к автоматизации | $\nu_{\text{а}}$ |
| | коэффициент чувствительности | $K_{\text{ч}}$ | атмосферное давление | p , Па |
| | номинальные параметры | $V_{\text{П}}$ | запыленность | c , г/м ³ |
| | исполнение по защищенности | IP | влажность окружающей среды | φ , % |
| | срок службы | T , ч | характер нагрузки | β , % |
| | вероятность безотказной работы | $P(t)$ | занятость в течение суток и года | $T_{\text{Г(сут.)}}$, ч |
| | характеристики внутренней защиты | СЗ | параметры приемника энергии | $\nu_{\text{п}}$ |
| | затраты на приобретение и монтаж | С, руб. | параметры источника энергии | $\nu_{\text{и}}$ |
| | затраты на техническое обслуживание и ремонт | $Z_{\text{ТОР}}$, руб. | | |
| | технологический ущерб из-за отказа | У, руб. | | |

| Часть объекта | Эксплуатационные свойства | | Условия эксплуатации | |
|---|--|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | наименование | обозначение, ед. изм. | наименование | обозначение, ед. изм. |
| Силовая и вторичная сеть передачи энергии | массо-габаритные размеры | m , кг | режим работы | ПВ, % |
| | КПД | η , % | температура окружающей среды | t , °С |
| | исполнение по защищенности | IP | уровень вибрации | δ , мкм |
| | срок службы | T , ч | влажность окружающей среды | φ , % |
| | вероятность безотказной работы | $P(t)$ | занятость в течение суток и года | $T_{г(сут.)}$, ч |
| | затраты на приобретение и монтаж | C , руб. | параметры приемника энергии | $v_{п}$ |
| | затраты на техническое обслуживание и ремонт | $Z_{ТОР}$, руб. | параметры источника энергии | $v_{и}$ |
| технологический ущерб из-за отказа | $У$, руб. | | | |

В таблице 2.1 перечисленные факторы относятся к объекту исследования как единичные показатели. Рассмотрим более подробно отдельные группы факторов.

1. Производственные условия характеризуют энергетическую составляющую изучаемого объекта исследования. К ним относятся:

- нагрузка β (%), которая характеризует уровень отклонения от средней нагрузки оборудования в зависимости от требований технологического процесса (например, изменение нагрузки источника энергии в диапазоне 70–130 % от номинальной);
- режим работы (для механического, гидравлического и электрического энергоснабжения режимы описывают по-разному, более подробно их рассмотрим при синтезе системы);
- занятость в течение суток и года $T_{г}$ и $T_{сут.}$ (ч), которые можно определить как в абсолютных, так и в относительных единицах [118, 274];
- эксплуатационная ответственность элементов объекта исследования u_o [109]:

$$u_o = \frac{Y_T}{Y_P}, \quad (2.2)$$

где U_T – величина технологического ущерба из-за отказа оборудования, руб.; U_P – величина затрат на ремонт отказавшего оборудования, руб.;

- условия пуска и остановки оборудования, а также хранения в период неиспользования;

- площадь полива S , га;

- поливная норма $m_{\text{пн}}$, м³/га.

2. Условия окружающей среды влияют на работоспособность системы энергоснабжения, а именно ее физические факторы. К ним относятся:

- результирующая температура окружающей среды t (°C), которая воздействует на элементы системы энергоснабжения со стороны выделенного тепла смежного оборудования в полевых условиях под прямыми солнечными лучами;

- запыленность окружающего воздуха c (г/м³) – в полевых условиях влияет на качество работы системы управления и в целом оборудования;

- прямые солнечные лучи УФ (эр/м²), поскольку ультрафиолетовое излучение разрушает детали, выполненные из пластика и полиэтилена;

- давление воздуха p (Па);

- влажность воздуха φ (%);

- уровень вибрации δ (мкм) на местах установки оборудования.

Для комплексного учёта условий окружающей среды приняты различные методики [11, 12, 254, 29, 35, 39, 40, 47, 56, 57, 68, 70, 73, 84, 100, 107, 109, 118, 119, 130, 141, 144, 159, 179, 183, 187, 195, 228, 266, 267]. Они справедливы и для отдельных видов оборудования. Однако в силу того, что вид источника энергии не определен, то в этом случае необходимо пользоваться рекомендациями [188, 322].

3. Условия обслуживания влияют на своевременность и качество выполнения профилактических мероприятий (оперативное обслуживание, техническое обслуживание (ТО), текущий (ТР) и капитальный ремонты). Они характеризуются следующими единичными показателями:

- периодичность выполнения технического обслуживания, текущего ремонта $\Pi_{\text{ТО(ТР)}}$ (мес.), благодаря чему оборудование поддерживается в работоспособном и исправном состоянии;

- состав операций ТО и ТР, установленный в соответствующих нормативных документах [322] с ориентацией на технологический процесс;
- оснащенность ремонтно-обслуживающей базы инструментами, запасными частями, средствами диагностирования, что позволяет оперативно и качественно выполнять профилактические мероприятия и устранять аварийные ситуации;
- квалификация персонала службы эксплуатации.

Более подробно влияющие факторы рассмотрим при синтезе системы энергоснабжения ДМ.

2.3 Экономические аспекты цели исследования

На практике главным внешним фактором воздействия на систему является экономическое положение спроса и предложения. Рассматривая дождевальную машину как товар, который имеет определенную цену, устанавливают возможность получения прибыли от ее использования.

Рассмотрим затраты на возделывание культуры без полива и с поливом (дождеванием) на одной и той же площади S с одинаковой оросительной нормой $m_{\text{пн}}$:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{пп}} + Z_{\text{п}} + Z_{\text{у}} &\rightarrow N_1 \\ Z_{\text{пп}} + Z_{\text{п}} + Z_{\text{д}} + Z_{\text{у}} &\rightarrow N_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где $Z_{\text{пп}}$ – затраты на подготовку почвы, руб.; $Z_{\text{п}}$ – затраты на посевную кампанию, руб.; $Z_{\text{у}}$ – затраты на уборочную кампанию, руб.; $Z_{\text{д}}$ – затраты на полив дождеванием, руб.; N_1 – масса урожая без полива, кг; N_2 – масса урожая с поливом, кг.

Тогда прирост урожая от полива дождеванием ΔN :

$$\Delta N = N_2 - N_1. \quad (2.4)$$

Экономическая эффективность от покупки дождевальной машины и устройства оросительной сети оценивается прямой и косвенной составляющими. Косвенный (интегральный) эффект заключается в общем поддержании водного баланса земель сельскохозяйственного назначения, сохранении плодородия почвы и т. п. Прямой эффект \mathcal{E}_n за n лет эксплуатации можно определить по формуле:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n c_i \Delta N_i, \quad (2.5)$$

где c_i – цена за 1 кг культуры в i -м году, руб.; ΔN_i – прирост урожая от полива в i -м году, кг; n – количество лет окупаемости ДМ, лет.

Затраты на полив дождеванием включают в себя затраты на устройство оросительной сети, покупку дождевальной машины, затраты на подачу воды и эксплуатацию оборудования. Если учесть государственную поддержку в создании оросительной сети, а затраты на подачу воды включить в общие эксплуатационные затраты, то общие затраты на полив дождеванием Z_d в упрощенном виде запишем:

$$Z_d = \frac{K_{\text{ДМ-нар}}}{n(1+r)^n} + Z_{\Theta}^n, \quad (2.6)$$

где r – ставка сложного процента, учитывающая реальную процентную ставку и уровень инфляции, о. е. [168, 300]; n – количество расчетных лет в инвестиции полива дождевальной машиной; $K_{\text{ДМ-нар}}$ – наращенные капиталовложения в дождевальную машину за n лет, руб.; Z_{Θ}^n – эксплуатационные затраты на полив за n лет использования, руб.

Тогда суммарные затраты с учетом эффекта:

$$\Delta Z = Z_d - \Theta_n. \quad (2.7)$$

Из выражения (2.7) можно выделить условие экономически целесообразного полива:

$$\Delta Z < 0. \quad (2.8)$$

Подставим в данное условие выражения (2.5) и (2.6):

$$\frac{K_{\text{ДМ-нар}}}{n(1+r)^n} + Z_{\Theta}^n < \sum_{i=1}^n c_i \Delta N_i. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) представляет собой неравенство, в котором не учитывается уровень рентабельности применения дождевальной машины, поэтому преобразуем его с учетом рентабельности и получим следующее выражение:

$$K_{\text{ДМ-нар}} + Z_{\Theta}^n n(1+r)^n + R_{\text{ДМ}} A_{\text{ДМ}} < \sum_{i=1}^n c_i \Delta N_i n(1+r)^n. \quad (2.10)$$

где $R_{\text{дм}}$ – рентабельность применения дождевальной машины; $A_{\text{дм}}$ – средняя величина текущих активов на полив дождевальной машиной кругового действия, руб.

Из выражения (2.10) следует, что экономически выгодно применять дождевальную машину, если за весь срок эксплуатации суммарные затраты на ее покупку и эксплуатацию с учетом прибыли (уровня рентабельности) меньше получаемого эффекта от прироста урожая. Как показывают исследования [231, 293, 309], прирост урожая – это случайная величина, которая зависит от многих факторов. Однозначно повлиять на значение этого показателя невозможно. Левая часть выражения (2.10) определяет вектор поиска выполнения полученного условия, несмотря на величину прироста урожая:

$$\left. \begin{array}{l} K_{\text{дм}} \rightarrow K_{\text{одм}} \\ Z_{\text{э}} \rightarrow Z_{\text{оэ}} \end{array} \right\}, \quad (2.11)$$

где $K_{\text{одм}}$, $Z_{\text{оэ}}$ – соответственно минимальные капиталовложения в дождевальную машину при оптимальной системе энергоснабжения и минимальные эксплуатационные затраты, руб.

Таким образом, условие (2.10) и пути достижения цели за счет выбора оптимальной системы, совершенствования способов и средств энергоснабжения дождевальной машины с позиции энергосбережения подтверждаются параметрами выражения (2.11). Так, например, оптимальная система энергоснабжения дождевальной машины приведет к снижению капиталовложений, а энергосберегающие способы и средства позволят сократить эксплуатационные затраты до оптимального значения.

2.4 Обоснование эффективности энергоснабжения дождевальной машины кругового действия

Исследование энергоснабжения дождевальной машины приобретает конкретное значение после определения общего показателя эффективности. На основе этого показателя можно сравнить системы энергоснабжения на одной и той же дождевальной машине, эксплуатируемой в конкретных условиях.

Показателей эффективности может быть множество, но объективную оценку с учетом всех действующих факторов может дать только обобщенный показа-

тель. Его можно назвать определяющим показателем, относительно которого принимают оптимальную систему энергоснабжения.

Выделение точного критерия дает объективную оценку результата, а выделение ошибочного приводит к неэффективному или неправильному решению проблемы.

В различных научных источниках [101, 118, 130] даны рекомендации по постановке и выделению критерия оптимальности. Как известно, любая система направлена на выполнение конкретной функции. При этом система является частью надсистемы и должна удовлетворять ее требованиям. Вместе с этим внутри системы имеются элементы, которые подчиняются индивидуальным законам. Специфика взаимосвязанных элементов такова, что внутри системы сформированы индивидуальные требования к функционированию. В результате характеристикой функционирования системы выступает такой показатель, который удовлетворяет требованиям надсистемы и составных элементов внутри системы.

Для оценки показателя эффективности системы энергоснабжения ДМ сформулируем требования надсистемы:

- объективность оценки энергоснабжения дождевальных машин кругового действия с точки зрения мелиорации в РФ;

- комплексность учета действующих факторов на систему энергоснабжения;
- учет цели функционирования системы энергоснабжения.

Требования к критерию внутри системы следующие:

- способность учета содержания системы энергоснабжения;
- учет диапазона возможных изменений параметров основных факторов и элементов системы;
- возможность наглядного математического описания.

В современной технической литературе [183, 262, 263] приведены различные оптимальные показатели дождевальных машин кругового действия: энергоемкость на 1000 м³ поданной воды (кВт·ч/1000 м³), удельный расход энергии (кВт/га), средняя мощность дождя (Вт/м²), интенсивность отказов ДМ (год⁻¹), коэффициент эффективного полива и т. п. [122, 125, 293]. Однако данные критерии являются частными показателями и не удовлетворяют вышеуказанным требова-

ниям. Необходимо учитывать более общие параметры, так как, например, удельный расход энергии учитывают установленная мощность и продолжительность работы энергооборудования, но по ним нельзя оценить эксплуатационные показатели, а также энергоемкость поданной воды.

Надежность энергоснабжения ДМ может быть оценена с позиции проектирования, создания и эксплуатации [57, 100, 119, 193, 277, 287, 311]. Как показывают результаты, наиболее полную оценку надежности дает критерий приведенных удельных затрат с учетом всех стадий жизненного цикла энергоснабжения. В таком случае суммарные данные о затратах удовлетворяют требованиям надсистемы и другим смежным системам.

Показатель эффективности системы энергоснабжения выводят из общего показателя эффективности применения дождевальная машины в целом, включая водоподачу и трудовые ресурсы. В соответствии с этим эффективность оптимальной системы энергоснабжения дождевальная машины \mathcal{E}_o можно определить по формуле:

$$\mathcal{E}_o = (z_{\text{п}} - z_{\text{по}})S, \quad (2.12)$$

где $z_{\text{п}}$, $z_{\text{по}}$ – соответственно приведенные суммарные затраты на единицу поливной площади при базовом и оптимальном энергоснабжении, руб./га; S – поливная площадь дождевальная машины кругового действия, га.

Суммарные затраты включают в себя затраты на приобретение дождевальная машины вместе с существующей системой энергоснабжения и эксплуатационные затраты. В стоимость машины заложен комплект энергооборудования, который характеризует производительность машины, энергоемкость процесса полива, уровень эксплуатационной надежности и затраты на энергетические ресурсы. По этим данным можно определить затраты на трудовые ресурсы, эксплуатацию и водоподачу. При выборе оптимальной системы энергоснабжения можно улучшить работу дождевальная машины с точки зрения получения энергетического, технологического, трудового эффекта, т. е. снизить трудовые, энергетические и материальные затраты при той же площади полива.

Рассмотрим приведенные затраты как сумму затрат на приобретение ДМ $C_{\text{ДМ}}$ и затрат на эксплуатацию $Z_{\text{ДМ}}$. При этом последние включают в себя затраты

на энергоресурсы. Затраты на приобретение дождевальная машины рассмотрим как затраты на покупку трубопровода, опорных тележек, составных частей, комплекта оборудования системы энергоснабжения и на монтаж конструкции. Затраты на эксплуатацию рассмотрим как сумму базовых затрат на обслуживание трубопровода и затрат, связанных с эксплуатацией оборудования системы энергоснабжения:

$$Z_{\text{п}} = \frac{[K_{\text{дм}} + C] + [Z_{\text{дмб}} + Z_{\text{дмэ}}(C)]}{S}; \quad (2.13)$$

$$Z_{\text{по}} = \frac{[K_{\text{дм}} + C_0] + [Z_{\text{дмб}} + Z_{\text{дмэ}}(C_0)]}{S}, \quad (2.14)$$

где $K_{\text{дм}}$ – стоимость, доставка и установка дождевальная машины без комплекта энергооборудования, руб.; $Z_{\text{дмб}}$ – базовые эксплуатационные затраты на дождевальную машину без учета затрат, связанных с эксплуатацией энергооборудования и затрат на энергоресурсы, руб.; C и C_0 – соответственно стоимость оборудования, доставка и установка базового и оптимального вариантов энергоснабжения дождевальная машины, руб.; $Z_{\text{дмэ}}(C)$ и $Z_{\text{дмэ}}(C_0)$ – соответственно затраты на эксплуатацию и энергоресурсы оборудования базового и оптимального вариантов энергоснабжения дождевальная машины, руб.

Подставим (2.13), (2.14) в исходное выражение (2.12) и, преобразуя его, получим:

$$\Delta_0 = [C - C_0] + [Z_{\text{дмэ}}(C) - Z_{\text{дмэ}}(C_0)], \quad (2.15)$$

или

$$\Delta_0 = [C + Z_{\text{дмэ}}(C)] - [C_0 + Z_{\text{дмэ}}(C_0)]. \quad (2.16)$$

Максимальный эффект будет достигнут при наибольшей разности выражения (2.16). Тогда минимум вычитаемого выражения (2.16) является критическим показателем оптимальной системы энергоснабжения дождевальная машины $V_{\text{кр}}$:

$$V_{\text{кр}} = [C_0 + Z_{\text{дмэ}}(C_0)] \rightarrow \min. \quad (2.17)$$

Энергооборудование требует проведения профилактических мероприятий, которые заключаются в техническом обслуживании и текущем ремонте. Затраты

на их выполнение складываются из затрат на заработную плату обслуживающему персоналу, на оснащение ремонтной базы, на покупку запасных частей и прочих затрат, связанных с организацией обслуживания.

Другие издержки, связанные с уровнем надежности системы энергоснабжения, потерями энергии в системе, также включены в эксплуатационные затраты. Эти издержки в прямом проявлении формируют технологический ущерб. Из-за отказа энергетического оборудования простаивает дождевальная машина, что приводит к недополучению ожидаемого урожая и, следовательно, к увеличению сроков окупаемости ДМ и снижению ее эффективности.

Определим эффективность применения оптимальной системы энергоснабжения. Сравним суммарные затраты на базовый $K_{\text{Э}}$ и оптимальный $K_{\text{Э}_0}$ варианты энергоснабжения, в которые включены стоимость оборудования и эксплуатационные затраты:

$$K_{\text{Э}} = C + Z_{\text{ДМЭ}}(C), \quad (2.18)$$

$$K_{\text{Э}_0} = C_0 + Z_{\text{ДМЭ}}(C_0). \quad (2.19)$$

Примем ограничения, что рассматриваемые дождевальные машины выполняют одинаковую поливную норму, работают на одинаковой поливной площади, с одинаковым давлением на гидранте, а также с одинаковыми конструкциями и диаметром водораспределительного трубопровода. Тогда эффект достигается тогда, когда за весь срок эксплуатации $t_{\text{с}}$ разность суммарных затрат будет максимальной:

$$\text{Э}_0 = K_{\text{Э}} - K_{\text{Э}_0} \rightarrow \max. \quad (2.20)$$

Представим графически варианты получаемого эффекта (рисунках 2.4–2.6).

В данном случае оптимальный вариант системы энергоснабжения имеет меньшую стоимость энергооборудования, а также затраты на его эксплуатацию за весь срок эксплуатации в среднем ниже, чем эксплуатационные затраты базового варианта энергоснабжения.

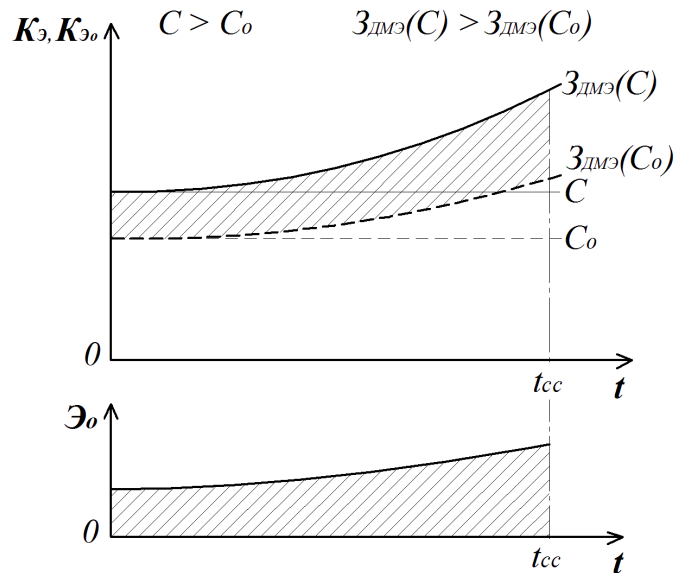


Рисунок 2.4 – Суммарный эффект применения оптимального варианта энергоснабжения при условии $C > C_0$, $Z_{DM}(C) > Z_{DM}(C_0)$

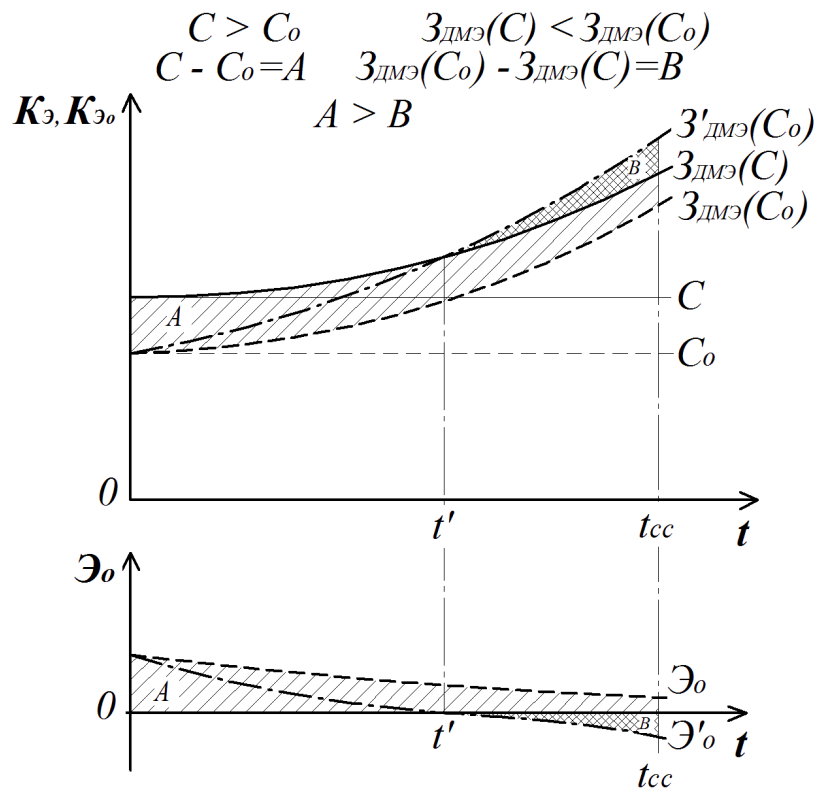


Рисунок 2.5 – Суммарный эффект применения оптимального варианта энергоснабжения при условии $C > C_0$, $Z_{DM}(C) < Z_{DM}(C_0)$

Однако средние эксплуатационные затраты оптимальной системы энергоснабжения могут быть больше эксплуатационных затрат базового варианта (рисунок 2.5). Если за весь срок эксплуатации эти затраты различаются незначительно, то суммарное значение эффекта в результате получается положительным (на рисунке 2.5 отмечена пунктирная линия \mathcal{E}_0). Если же алгебраическая сумма эксплуа-

тационных затрат сравниваемых вариантов в течение какого-либо промежутка времени t' становится равной нулю, то возникает дополнительное условие:

$$A > B, \quad (2.21)$$

где A – разность стоимостей оборудования систем энергоснабжения, руб.

$$C - C_0 = A;$$

B – сумма разности эксплуатационных затрат за срок $t_{cc} - t'$, руб.

$$З_{\text{ДМЭ}}(C_0) - З_{\text{ДМЭ}}(C) = B.$$

При условии (2.21) эффект \mathcal{E}' изменяется так, как показано на графике рисунка 2.5 штрихпунктирной линией.

Если в условии (2.21) стоимость оборудования базового варианта будет меньше стоимости оборудования оптимального варианта, тогда условие применения оптимального варианта будет следующим (рисунок 2.6):

$$A < B. \quad (2.22)$$

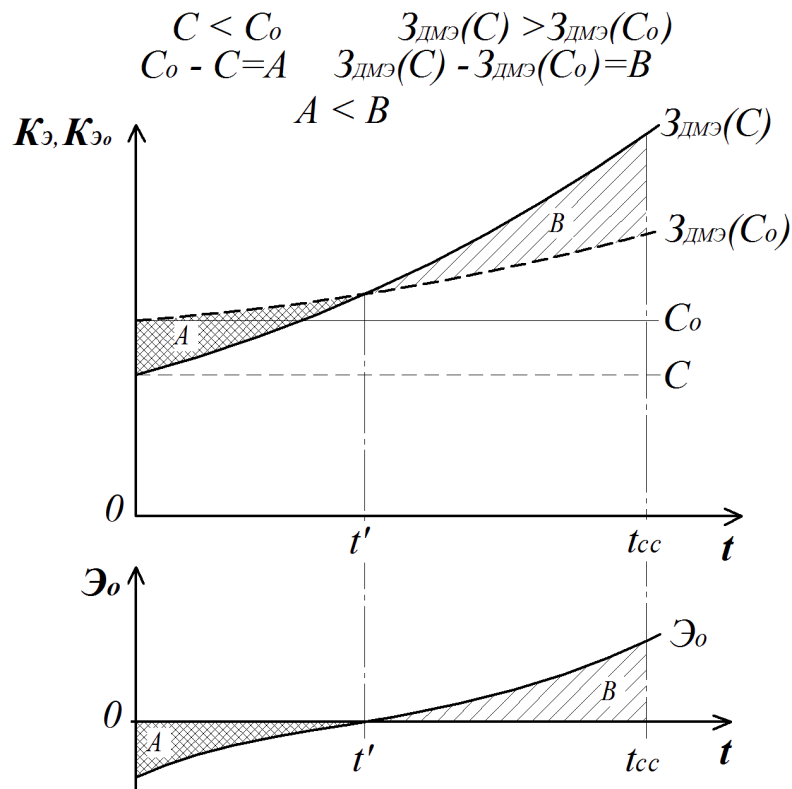


Рисунок 2.6 – Суммарный эффект применения оптимального варианта энергоснабжения при условии $C < C_0$, $З_{\text{ДМЭ}}(C) > З_{\text{ДМЭ}}(C_0)$

Анализ графиков на рисунках 2.4–2.6 показывает, что эффект применения оптимального варианта энергоснабжения – это функция от времени, а решение будет интегралом по времени.

Примем за исходное выражение (2.16) и допустим, что стоимости оборудования базового и оптимального вариантов равны ($C = C_0$). Тогда эффект применения оптимального варианта будет описан условием:

$$Z_{\text{ДМЭ}}(C) - Z_{\text{ДМЭ}}(C_0) > 0. \quad (2.23)$$

Если принять, что эксплуатационные затраты складываются из затрат на ресурс (энергию), затрат на обслуживание и ремонт, а также возможного ущерба от недополучения желаемого результата:

$$Z_{\text{ДМЭ}}(C) = c_p P_{\Sigma} t_{\text{cc}} + z_{\lambda} \lambda + Y_1; \quad (2.24)$$

$$Z_{\text{ДМЭ}}(C_0) = c_p P_{\Sigma_0} t_{\text{cc}} + z_{\lambda} \lambda_0 + Y_0, \quad (2.25)$$

где c_p – цена на ресурс (энергию), руб./кВт·ч; P_{Σ} , P_{Σ_0} – суммарные мощности полива (насоса водоподачи, дождевальная машины) соответственно базового и оптимального вариантов энергоснабжения, кВт·ч; t_{cc} – срок службы дождевальной машины (срок эксплуатации до предельного состояния [118, 204] об орудования – примем, что рассматриваемые системы имеют одинаковый срок эксплуатации), ч; z_{λ} – удельные затраты на эксплуатацию (допустим, что для рассматриваемых вариантов имеют одинаковое значение), руб./ч; λ , λ_0 – интенсивности отказов оборудования соответственно базового и оптимального вариантов, ч⁻¹; Y_1 , Y_0 – ущербы из-за отказов оборудования соответственно базового и оптимального вариантов, руб.

Примем некоторые допущения. Суммарная мощность оптимального варианта энергоснабжения будет отличаться от базового варианта на некоторую величину:

$$P_{\Sigma_0} = a P_{\Sigma}, \quad (2.26)$$

где a – коэффициент, показывающий отношение суммарных мощностей полива оптимального к базовому варианту энергоснабжения, $0,5 < a < 1,5$.

Пусть ущербы из-за отказов оборудования определяются как произведение удельного ущерба на продолжительность восстановления:

$$Y_1 = y_t t_{\text{в1}}; \quad (2.27)$$

$$Y_0 = y_t t_{\text{в0}}, \quad (2.28)$$

где y_t – удельный ущерб из-за отказов оборудования, руб./ч; $t_{\text{в1}}$ и $t_{\text{в0}}$ – продолжительность восстановления соответственно базового и оптимального вариантов, ч.

Допустим, что продолжительность восстановления одного отказа базового и оптимального вариантов равны, так как восстановлением работоспособности за-

нимается одна и та же энергетическая служба. Тогда можно предположить, что продолжительность восстановления зависит от количества отказов на рассматриваемом промежутке времени:

$$t_{в1} = f(\lambda). \quad (2.29)$$

На основе (2.29) можно записать ущерб через интенсивность отказов и относительных технологический ущерб u , определенный для ДМ:

$$Y_1 = uz_\lambda\lambda; \quad (2.30)$$

$$Y_0 = uz_\lambda\lambda_0. \quad (2.31)$$

Интенсивность отказов оборудования оптимального варианта примем:

$$\lambda_0 = b\lambda, \quad (2.32)$$

где b – коэффициент, показывающий отношение интенсивностей отказов оборудования оптимального к базовому варианту энергоснабжения, $0,3 < b < 1,8$.

С учетом данных допущений, преобразовав условие (2.23), запишем:

$$\pi_p P_\Sigma t_{cc}(1-a) + z_\lambda \lambda (1+u)(1-b) > 0. \quad (2.33)$$

Из выражения (2.33) видно, что первое слагаемое зависит от времени. Второе слагаемое необходимо выразить по времени через интенсивность отказов. Согласно [100], выразим интенсивность отказов как вероятностный показатель безотказности:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.34)$$

где t – промежуток времени, в течение которого рассчитана интенсивность отказов λ (в нашем случае $t = t_{cc}$), ч.

Тогда интенсивность отказов:

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{1}{P(t_{cc})}\right)}{t_{cc}}. \quad (2.35)$$

Преобразуем выражение (2.33), используя (2.35) и следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} Y &= z_\lambda \ln\left(\frac{1}{P(t_{cc})}\right)(1+u), \\ Z &= \pi_p P_\Sigma \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

получим:

$$Z(1-a)t_{cc} + \frac{Y(1-b)}{t_{cc}} > 0. \quad (2.37)$$

Интегрируя (2.37), получим эффект от применения оптимальной системы энергоснабжения ДМ:

$$\mathcal{E}_o(t_{cc}) = \int_0^{t_{cc}} \left(Z(1-a)t_{cc} + \frac{Y(1-b)}{t_{cc}} \right) dt_{cc}. \quad (2.38)$$

Решив данный интеграл (2.38), получим:

$$\mathcal{E}_o = Z(1-a)t_{cc} + Y(1-b) \ln t_{cc} + A, \quad (2.39)$$

где A – разность стоимостей оборудования систем энергоснабжения, руб.

Решение учитывает изменения мощностей сравниваемых вариантов, а также уровень надежности, выраженный вероятностным показателем надежности. Вероятность безотказной работы включает в себя вероятности составных элементов или отдельного оборудования системы. Достаточная чувствительность и объективность эффективности при сравнении различных вариантов системы отражают справедливость выбора того или иного варианта системы энергоснабжения и служат ориентиром для оценки выбранного варианта энергоснабжения ДМ. Более подробно рассмотрим данный показатель далее при учете условий эксплуатации ДМ.

2.5 Синтез структуры системы энергоснабжения дождевальных машин

2.5.1 Обоснование исходных данных

Энергоснабжение дождевальных машин основано на особенностях движения опорных тележек по орошаемой территории, которая имеет различные характеристики по составу почвы, выращиваемой культуры, поливной норме, площади полива и т. п. В первую очередь следует ориентироваться на агротехнические требования к поливу и выращиваемую культуру, затем ограничиться размерами участка, т. е. поливной площадью, по которой рассчитывают геометрические размеры дождевальной машины.

К техническим особенностям полива относятся варианты оросительной сети подведения воды. Для дождевальных машин кругового действия используют только закрытые оросительные сети. Согласно [183, 261, 263], закрытая ороси-

тельная сеть представляет собой трубопровод, который проложен в траншее на глубине 0,5–1,0 м. К гидранту ДМ присоединен водораспределительный трубопровод и в этом месте установлена неподвижная опора. Протяженность трубопровода, его диаметр, а также техническое состояние оросительной сети на первом этапе ограничивают выбор ДМ и, соответственно, системы энергоснабжения.

Распределение воды по поливной площади в дождевальными машинах кругового действия зависит от скоростных режимов и принципа действия движителей. В различной литературе [48, 180, 240, 254, 289] отмечается, что движителями опорных тележек ДМ могут быть колеса, гусеничные системы, шагающие стопы. Они характеризуются индивидуальной производительностью, надежностью, ремонтпригодностью и другими показателями. На основе принципа работы движителя определяют тип двигателя и его систему управления.

Выбор движителя ограничен поставками заводов-изготовителей. В настоящее время чаще используют ДМ с жесткими колесами или колесами на пневматических шинах [263, 289].

Передача энергии движителю осуществляется с помощью электропривода, гидропривода или механического привода. Объективно оценить затраты энергии и сопоставить различные виды используемой энергии возможно с помощью синтеза каждой системы энергоснабжения.

Синтез структуры системы состоит из следующих этапов [101, 156–158]:

- обоснование исходных данных системы;
- синтез структуры для сформированных исходных данных;
- выделение особенностей результатов синтеза структуры систем;
- разработка рекомендаций и решений синтеза для цели системы.

Обоснование исходных данных предполагает всестороннее рассмотрение условий работы системы и требований, предъявляемых к ней, исходя из цели. На данном этапе выделяют все внутренние и внешние параметры системы, а также ограничения действия системы со стороны надсистемы. Важным этапом обоснования является наиболее полный охват всех признаков, влияющих на достижение цели системы.

Эффективностью системы энергоснабжения можно считать достижение цели при минимальной стоимости комплекта энергооборудования, минимальном энергопотреблении, а также при минимальных затратах на техническое обслуживание и ремонт. Эффективность системы зависит от внутренних и внешних факторов, а также от ограничений, представленных в виде требований к выполнению процесса.

Рассмотрим все факторы и ограничения, влияющие на показатель эффективности системы энергоснабжения как функцию:

$$V_{кpw} = f(\mathcal{E}_o; Y; O), \quad (2.40)$$

где \mathcal{E}_o – эффективность системы, зависящая от эксплуатационных свойств и стоимости системы энергоснабжения, Y – совокупность показателей, зависящих от условия эксплуатации, O – ограничения, наложенные на систему относительно агротехнических требований к поливу и конструктивных требований к дождевальной машине (все показатели – безразмерные условные единицы).

На первом этапе формулируют требования к выполнению процесса полива по состоянию оросительной сети. Требования же к системе энергоснабжения формируют на основе исходных данных о возможности использования того или иного вида энергии. В качестве исходных данных принимают ряд агротехнических требований, условий эксплуатации и конструктивных особенностей ДМ. При выполнении синтеза эти данные рассматривают как ограничения.

Ограничения, влияющие на качество работы рассматриваемой системы, как основная группа факторов формулируют на все виды возможного использования энергооборудования для дождевальной машины кругового действия:

$$O = f(O_M; O_K; O_T; O_D; O_I; O_Y), \quad (2.41)$$

где O_M – группа мелиоративных показателей; O_K – группа кинематических показателей; O_T – группа технических показателей; O_D – группа показателей двигателей; O_I – группа ограничений по применению источника энергии; O_Y – группа показателей управления.

К мелиоративным показателям ограничений O_M , влияющих на систему энергоснабжения, относят:

$$O_M = \{S; m_{\text{пн}}; p\}, \quad (2.42)$$

где S – площадь полива, га; $m_{\text{пн}}$ – поливная норма, м³/га; p – входное давление воды, МПа.

Кинематические показатели ограничений O_K :

$$O_K = \{\omega_{\text{дм}}; v; s; t_o; a_y\}, \quad (2.43)$$

где $\omega_{\text{дм}}$ – скорость одного оборота ДМ, рад/ч; v – линейная скорость перемещения опорной тележки секции, м/с; s – путь, пройденный опорной тележкой одной секции, м; t_o – продолжительность одного оборота ДМ, ч; a_y – ускорение при движении, м/с².

Линейная скорость перемещения необходима для того, чтобы определить механические параметры двигателя, например, частоту вращения электродвигателя.

К группе *технических ограничений* O_T относятся:

$$O_T = \{\Gamma; M; m; L; L_1; d\}, \quad (2.44)$$

где Γ – габаритные размеры ДМ (длина, ширина, высота), м×м×м; M – масса ДМ в сухом виде, кг; m – масса одной секции в сухом виде, кг; L – длина дождевальной машины, м; L_1 – длина одной секции ДМ, м; d – диаметр водопроводящего трубопровода, м.

В рассматриваемом варианте рабочая масса будет складываться из массы ДМ в сухом виде и массы воды, находящейся внутри трубопровода и в гибких отводах. Массу воды можно выразить через ее плотность и объем [60, 142], занимаемый пространство в трубопроводе.

В группу *ограничений показателей движителей* O_D входят подгруппы, которые различаются по принципу действия. Если рассматривать все возможные движители, как отмечалось ранее, то необходимо учитывать все параметры. Колеса $O_{\text{ДК}}$ характеризуются радиусом r_k (м) и шириной b_k (м); гусеничный ход $O_{\text{ДГ}}$ – типом гусеничной ленты, количеством шарниров $n_{\text{ш}}$ (шт.) и катков N_k (шт.), длиной ленты l_r (м); шагающие стопы $O_{\text{ДС}}$ – габаритными размерами (длина, ширина и высота – $a_{\text{ст}} \times c_{\text{ст}} \times z_{\text{ст}}$), м×м×м, количеством рычагов i_p и их длиной j_p (м).

Выбор движителя для опорных тележек ДМ основан на показателях надежности, стоимости и простоты эксплуатации каждой системы. На этапе выделения ограничений достаточно указать наличие всех возможных вариантов, чтобы в дальнейшем их учесть при теоретическом обосновании. Поэтому запишем:

$$O_{\text{Д}} = \{(r_{\text{к}}; b_{\text{к}}); (n_{\text{ш}}; N_{\text{к}}; l_{\text{Г}}); (a_{\text{ст}}; c_{\text{ст}}; z_{\text{ст}}; i_{\text{р}}; j_{\text{р}})\}. \quad (2.45)$$

В группу *ограничений применения источника энергии* $O_{\text{И}}$ входят подгруппы с индивидуальными показателями: подгруппа ограничений применения гидравлического источника питания $O_{\text{ИГ}}$ (механическая энергия потока жидкости), подгруппа ограничений применения электрического автономного питания $O_{\text{ИЭА}}$ (переносной генератор, аккумуляторная батарея), подгруппа ограничений применения электрического централизованного питания $O_{\text{ИЭЦ}}$ (кабельная или воздушная линия), а также подгруппа ограничений применения двигателя внутреннего сгорания $O_{\text{ИДВС}}$.

Каждая подгруппа ограничений применения источника питания имеет ряд показателей. Так как источник энергии входит в систему энергоснабжения ДМ, в объект изучения, то каждый источник будет рассмотрен детально.

В *ограничения по управлению* $O_{\text{У}}$ дождевальная машина входят показатели возможных функциональных действий. Каждое действие машины предполагает набор элементов автоматики (чувствительный элемент, преобразователь, логический элемент, исполнительный механизм). Поэтому на этапе формирования ограничений по управлению важно определить ряд достаточных и необходимых действий. К ним можно отнести: движение по кругу в прямом и обратном направлениях, ручное или автоматическое управление, возможность аварийной остановки, возможность регулирования скорости движения, обратную связь параметров управления.

Ограничения включают в себя диапазон выполняемых функций системы и габаритные размеры оборудования. Например, в мелиоративные ограничения по поливной площади входят длина водораспределительного трубопровода, количество секций ДМ, а также количество энергооборудования. Кинематические ограничения содержат диапазон скорости перемещения ДМ. При моделировании ра-

боты ДМ следует рассматривать ограничения в совокупности, чтобы точно определить работу системы энергоснабжения опорных тележек ДМ.

Ограничения не исключают использование разных вариантов системы энергоснабжения. Каждый вариант характеризуется исходными показателями, а при длительной эксплуатации – показателями эффективности. Исходные показатели относятся к внутренним свойствам рассматриваемой системы $V_{кpw}$, которые характеризуется эффективностью достижения цели \mathcal{E}_0 . Распишем \mathcal{E}_0 как функцию зависимости показателей свойств системы:

$$\mathcal{E}_0 = f(K_H; K_T; K_{ЭН}; K_{ТН}; K_C; K_{Э}; K_{ЭР}), \quad (2.46)$$

где K_H – показатель надежности; K_T – технический показатель системы; $K_{ЭН}$ – энергетический показатель; $K_{ТН}$ – технологический показатель; K_C – показатель стоимости комплекта; $K_{Э}$ – показатель эксплуатационных затрат при заявленных условиях работы; $K_{ЭР}$ – эргономический показатель.

Групповые показатели, в свою очередь, характеризуются единичными показателями.

Показатель надежности K_H может характеризоваться различными единичными показателями. Опишем данный показатель либо вероятностным – вероятность отказа $Q_0(t)$, либо комплексным показателем – коэффициент готовности K_T . При выборе системы достаточным и исчерпывающим показателем надежности можно принять вероятность того, что продолжительность (отказ) работы оборудования будет меньше заданного срока службы. Однако вероятностью отказа некорректно описывать оборудование, которое является ремонтпригодным. Поэтому при рассмотрении возможных систем энергоснабжения примем оба показателя надежности:

$$K_H = \{Q_0(t); K_T\}. \quad (2.47)$$

Технический показатель системы K_T :

$$K_T = \{m_{оэс}; \Gamma_{оэс}; T_{оэс}; H_{оэс}; N_{оэс}; И_{оэс}\}, \quad (2.48)$$

где $\Gamma_{оэс}$ – габаритные размеры оборудования системы энергоснабжения, $m \times m \times m$; $m_{оэс}$ – суммарная масса оборудования системы энергоснабжения, включая массу

дополнительных и расходных материалов, кг; $T_{OЭC}$ – типоразмерный ряд оборудования; $N_{OЭC}$ – номинальные параметры оборудования; $N_{OЭC}$ – количество комплектующих узлов и деталей; $I_{OЭC}$ – исполнение оборудования.

Единичные технические показатели характеризуют систему с общих физических позиций. При сравнении различных источников питания, помимо представленных показателей, выделяют индивидуальные параметры. Для гидравлического оборудования номинальными параметрами являются диаметр трубопровода, входное давление, выходное давление и т. п., для электрического – напряжение, ток, частота и т. п.

Под конкретную нагрузку подбирают соответствующее оборудование, что учитывается типоразмерным рядом заводов-изготовителей. Чем чаще шкала типоразмеров, тем точнее можно подобрать оборудование к условиям эксплуатации. Вместе с этим подбирают варианты исполнения оборудования. Такое разнообразие выбора позволяет определить оптимальный вариант.

Энергетический показатель системы $K_{ЭН}$ характеризует способность объекта передавать энергию движителю опорной тележки ДМ, приспособленность к переходным процессам, преобразованию, которые следует учитывать на основе пускового и номинального моментов:

$$K_{ЭН} = \{P_{\Sigma}; \eta; M_{П}; M_{ном}; t_p\}, \quad (2.49)$$

где P_{Σ} – максимальная требуемая мощность, кВт; η – коэффициент полезного действия, %; $M_{П}$, $M_{ном}$ – пусковой и номинальный моменты, Н·м; t_p – продолжительность работы ДМ, ч.

Экологический показатель $K_{ЭКО}$ характеризует объект с точки зрения безопасного выполнения технологического процесса. Для энергоснабжения опорных тележек к экологическим показателям можно отнести безвредность – отсутствие выделения ядовитых веществ в окружающую среду ζ (г/м³); безопасность применения и обслуживания объекта в нормальном и аварийном режимах, а также производительность Π (м²/ч) – максимальную площадь полива за 1 ч работы. Показатели безопасности характеризуют особенности объекта, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала при монтаже или эксплуатации от механи-

ческих, электрических, тепловых воздействий, ядовитых и взрывчатых паров, акустических шумов, радиоактивных излучений и других факторов:

$$K_{\text{эко}} = \{\zeta; Б; П\}, \quad (2.50)$$

где Б – характеристика безопасности.

Показатель стоимости K_C характеризует стоимость С (руб.) системы энергоснабжения ДМ:

$$K_C = \{C\}. \quad (2.51)$$

Показатель эксплуатации $K_{\text{Э}}$ содержит требования к технической эксплуатации, т. е. к обслуживанию и ремонту оборудования в нормальных условиях эксплуатации, которые заложены данными заводов-изготовителей. Эти требования связаны с занятостью оборудования и зависят от наработки, поэтому их приводят как среднегодовые:

$$K_{\text{Эк}} = \{t_{1ч} (T_{\text{ТО}} + T_{\text{ТР}}); Z_3; c_p W\}, \quad (2.52)$$

где $t_{1ч}$ – часовая тарифная ставка электромонтера, руб./ч; $T_{\text{ТО}}$ и $T_{\text{ТР}}$ – трудоемкость соответственно технического обслуживания и текущего ремонта всего комплекта энергооборудования, чел.-ч; Z_3 – затраты на запасные части и расходные материалы комплекта энергооборудования, руб.; c_p – цена на единицу ресурса, руб./кВт·ч; W – количество потребленной энергии, кВт·ч.

Эргономические показатели $K_{\text{ЭР}}$ характеризуют свойства объекта с точки зрения соответствия антропометрическим, гигиеническим, психологическим, психофизиологическим возможностям обслуживающего персонала. К этим показателям относятся удобство обслуживания системы персоналом, комфорт, чистота выполнения операций и т. п. Эргономические показатели принимают в виде коэффициентов, учитывающих производительность труда персонала относительно нормальных условий работы:

$$K_{\text{ЭР}} = \{k_{\text{ап}}; k_{\text{гигиен}}; k_{\text{возд}}\}, \quad (2.53)$$

где $k_{\text{ап}}$, $k_{\text{гигиен}}$, $k_{\text{возд}}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно антропометрические, гигиенические показатели, воздействие шумов, запахов и т. п., данные системы энергоснабжения.

Приведенные единичные показатели связаны с эффективностью \mathcal{E}_0 объекта исследования пропорциональной зависимостью, т. е. чем больше (меньше) единичный показатель, тем эффективней система при прочих равных условиях. Тогда единичные показатели соответствуют существующему определению показателя эффективности системы энергоснабжения.

Скруплезный учет представленных единичных показателей эксплуатационных свойств энергоснабжения усложняет синтез структуры и делает невозможным аналитическое описание предмета исследования – закономерностей изменения данных факторов друг от друга. Некоторые показатели невозможно оценить количественно (например, безвредность или безопасность), а некоторые из них можно оценить только в баллах (например, показатели эргономичности). Поэтому показатели эксплуатационных свойств следует рассматривать в конкретных условиях использования системы.

Внешними факторами, влияющими на качество рассматриваемой системы, являются условия окружающей среды и эксплуатации U :

$$U = \{U_{\text{И}}; U_{\text{С}}; U_{\text{РР}}\}, \quad (2.54)$$

где $U_{\text{И}}$ – условия использования оборудования; $U_{\text{С}}$ – условия окружающей среды; $U_{\text{РР}}$ – условия режимов работы.

Условия использования оборудования $U_{\text{И}}$ характеризуют движители опорных тележек ДМ. Единичными показателями являются: эквивалентная и средняя мощность одной секции ДМ $P_{\text{эkv}}$ и $P_{\text{ср}}$ (кВт), площадь полива S (га), функционал передачи энергии Φ (вращательное или возвратно-поступательное движение), число рабочих органов $x_{\text{ро}}$ (шт.):

$$U_{\text{И}} = \{P_{\text{эkv}}; P_{\text{ср}}; S; \Phi; x_{\text{ро}}\}. \quad (2.55)$$

Дестабилизирующие воздействия окружающей среды $U_{\text{С}}$ включают в себя совокупность факторов, которые вызывают отклонения свойств надежности системы, потери энергии и т. п. К ним относят: общие климатические условия $U_{\text{СК}}$,

место размещения Y_{CM} , результирующую влажность воздуха φ (%), запыленность σ_3 ($\text{г}/\text{м}^3$), загазованность α_3 ($\text{моль}/\text{м}^3$), уровень ультрафиолетового облучения $\gamma_{\text{уфи}}$ ($\text{эр}/\text{м}^2$), вибрации $\delta_{\text{виб}}$ (мкм), температуру окружающей среды τ_{oc} ($^{\circ}\text{C}$), условия хранения Y_{CX} :

$$Y_C = \{Y_{CK}; Y_{CM}; \varphi; \sigma_3; \alpha_3; \gamma_{\text{уфи}}; \delta_{\text{виб}}; \tau_{\text{oc}}; Y_{CX}\}. \quad (2.56)$$

Условия *режимов работы* Y_{PP} отражают возможные состояния технологического процесса опорных тележек дождевальнoй машины. Как правило, рабочий режим системы характеризуется продолжительностью ожидания $t_{\text{ож}}$, пусковым моментом времени $t_{\text{п}}$, продолжительностью выполнения функции $t_{\text{ф}}$ и продолжительностью остановки $t_{\text{т}}$ (ч):

$$Y_{PP} = \{t_{\text{ож}}, t_{\text{п}}, t_{\text{ф}}, t_{\text{т}}\}. \quad (2.57)$$

Комплексную оценку показателей условий эксплуатации по режиму работы и использования рассмотрим подробнее позже. Учет условий окружающей среды можно выполнить на основе принятой методики [118, 250, 274], когда действие указанных факторов находится в допустимом пределе данных заводоизготовителей. Такие условия называются легкими, действие одного фактора более значения нормы – нормальными, действие двух и более факторов выше нормы – тяжелыми.

Принимая во внимание действие рассмотренных единичных показателей, можно детально выполнить анализ функционально-структурных моделей различных систем энергоснабжения. Также на основе единичных показателей выделим укрупненные показатели, которые характеризуют условия эксплуатации дождевальных машин. На рисунке 2.7 представлены показатели, которые также необходимо учесть при выборе оптимальной системы энергоснабжения.

Таким образом, на основе единичных показателей ограничений, эффективности и условий эксплуатации сформированы основные укрупненные показатели, влияющие на выбор системы энергоснабжения. Основным критерием выбора является величина энергопотребления и эксплуатационные затраты, а ограничениями – поливная норма, площадь поливного участка и входное давление на гидранте

ДМ. Рассматривая различные типы привода при выборе оптимальной системы, также следует учесть суммарную мощность оборудования, его коэффициент полезного действия, надежность, массу составных элементов и оборудования системы, а также эксплуатационные затраты. Как показали вышеизложенные исследования, на эффективность системы также влияют ее стоимость и прирост прибыли от полива дождевальными машинами.

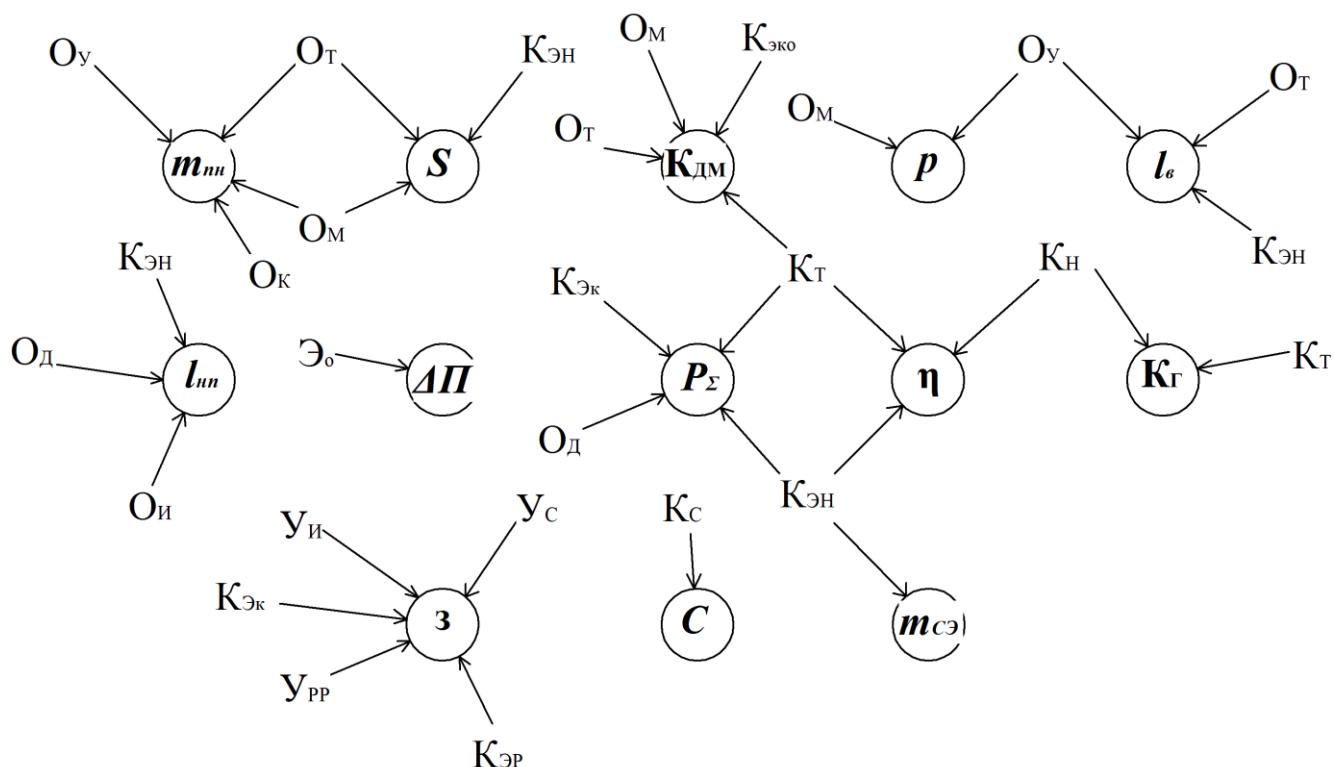


Рисунок 2.7 – Основные показатели учета при выборе системы энергоснабжения дождевальной машины: $m_{пн}$ – поливная норма; S – площадь полива; $K_{ДМ}$ – стоимость дождевальной машины без учета стоимости оборудования системы энергоснабжения; C – стоимость оборудования системы энергоснабжения; p – давление на гидранте ДМ; $l_{в}$ – удаленность ДМ от водоема; $l_{цп}$ – удаленность ДМ от централизованного источника питания; $\Delta\Pi$ – прирост прибыли от использования ДМ; P_{Σ} – суммарная мощность системы энергоснабжения ДМ; η – коэффициент полезного действия системы энергоснабжения; $K_{Г}$ – коэффициент готовности системы энергоснабжения; z – эксплуатационные затраты ДМ; $m_{СЭ}$ – масса оборудования системы энергоснабжения

Разработка критерия, обобщающего укрупненные показатели, сводится к сравнительному анализу различных типов привода дождевальных машин кругового действия, так как преобразование энергии в механических и гидравлических системах происходит неодинаково. Поэтому рассмотрим и проанализируем функциональные и структурные модели этих типов привода.

2.5.2 Функциональный анализ систем энергоснабжения

Система энергоснабжения характеризуется набором элементов, составных частей и оборудования. Качество взаимодействий элементов и узлов системы, их конструктивная надежность отражают эксплуатационные свойства системы энергоснабжения. Вместе с этим условия эксплуатации также влияют на свойства системы. Согласно теории эксплуатации электрооборудования [118, 274], любая энергетическая система проходит стадии приработки, нормальной эксплуатации и износа. Самой продолжительной стадией является нормальная эксплуатация, по которой оценивают качество связей элементов системы.

При рассмотрении нескольких систем с различными источниками энергии цель достигается различным набором энергооборудования. Чем меньше число элементов системы, тем она проще. Однако простая система не всегда является надежной, так как в ней возрастает сложность связей и повышается ответственность отдельных элементов.

Функциональный анализ различных вариантов энергоснабжения позволяет рассмотреть возможные варианты режимов движения опорных тележек, а также определить и изучить структуру систем, элементов и их взаимосвязей.

На основе данных [157] проведение функционально-структурного анализа рассматриваемой системы энергоснабжения необходимо начать с анализа возможных вариантов источника энергии (рисунок 2.8).

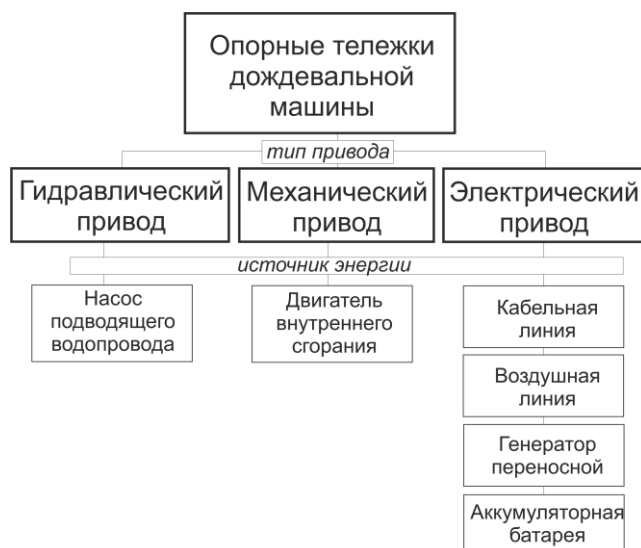


Рисунок 2.8 – Классификация систем энергоснабжения опорных тележек дождевальной машины

В соответствии с ограничениями O выражения (2.41) рассмотрим простейшие принципиальные схемы комплектов энергооборудования опорных тележек ДМ. Для этого следует принять дождевальную машину одного размера с конкретным числом секций. Возьмем дождевальную машину кругового действия, состоящую из пяти секций.

Комплект энергооборудования $V_{крГ}$ на гидравлическом приводе (рисунки 2.9 и 2.10) представляет собой совокупность устройств для преобразования и передачи энергии движителю посредством кинетической энергии потока жидкости (воды). В системах такого рода используют объемные гидромашины, рабочий процесс которых основан на поочередном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении ее из рабочей камеры. Гидропривод может быть выполнен в качестве гидродвигателя $МГ$ вращательного действия (см. рисунок 2.9) или гидродвигателя возвратно-поступательного действия – гидроцилиндра $Ц$ (см. рисунок 2.10), который подключен к гидрораспределителю $РН$. Управление последним осуществляется с помощью механической кулачковой передачи от прибора синхронизации движения в линию $ПСЛ$.

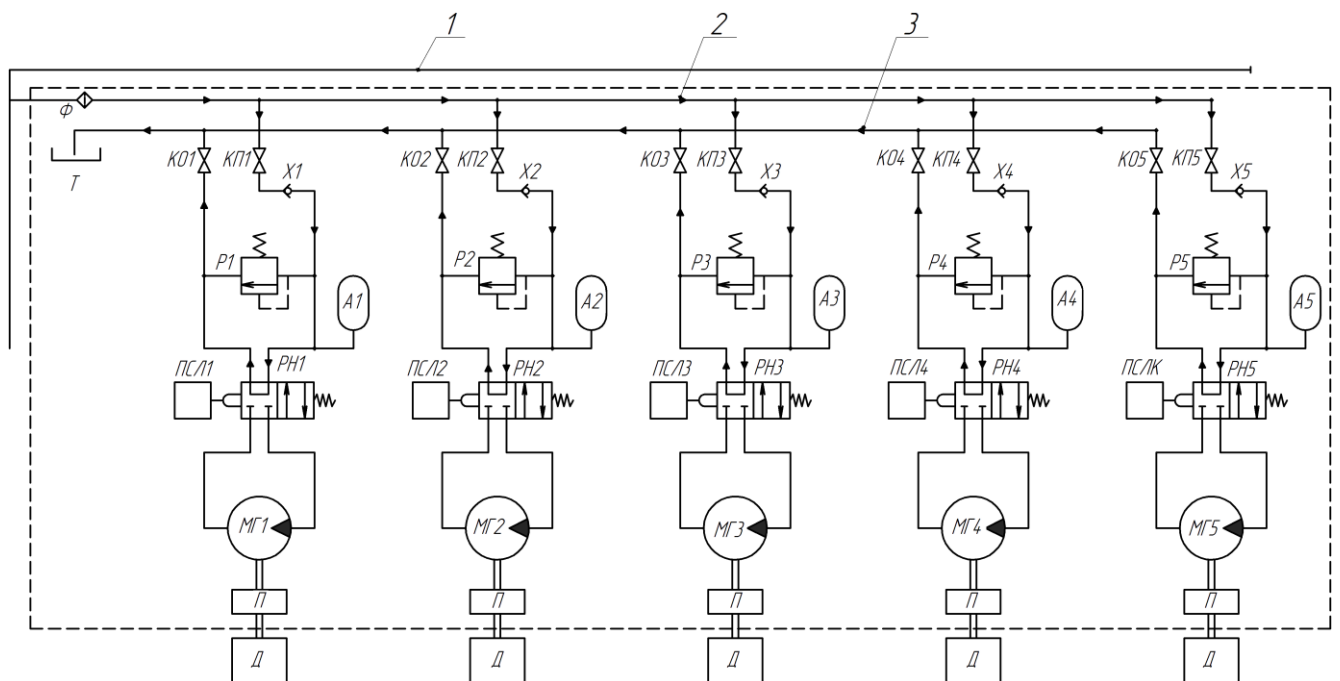


Рисунок 2.9 – Упрощенная гидравлическая схема комплекта энергооборудования с гидродвигателем вращательного действия: 1 – трубопровод; 2, 3 – гидролинии

Представленные на рисунках 2.9 и 2.10 гидравлические схемы действуют по системе разомкнутого контура движения рабочей жидкости. Источником питания

напорной гидролинии 2 является насосная станция водоподводящего трубопровода. Энергия рабочей жидкости подводится к двигателю через систему управления и дальше поступает в сливную гидролинию 3. Некоторые гидравлические схемы действуют в замкнутых контурах движения рабочей жидкости, например, в системах дождевальной машины T-L irrigation [105, 149, 246].

Поливная вода подается под давлением в водораспределительный трубопровод 1 и напорную гидролинию 2, являясь рабочей жидкостью системы гидропривода. Через прямой клапан *КП* и клапан обратного хода *X* рабочая жидкость поступает в гидроемкость *A*. Регулируя параметры механического *ПСЛ*, рабочая жидкость по напорной гидролинии поступает в гидрораспределитель *РН*. Путем открывания и закрытия каналов *РН* происходит питание гидродвигателя *МГ*. Предохранительный клапан *P* предназначен для ограничения предельного значения давления рабочей жидкости в системе, а обратный клапан *КО* – для ограничения и управления давлением рабочей жидкости и ее направления в сливную гидролинию 3.

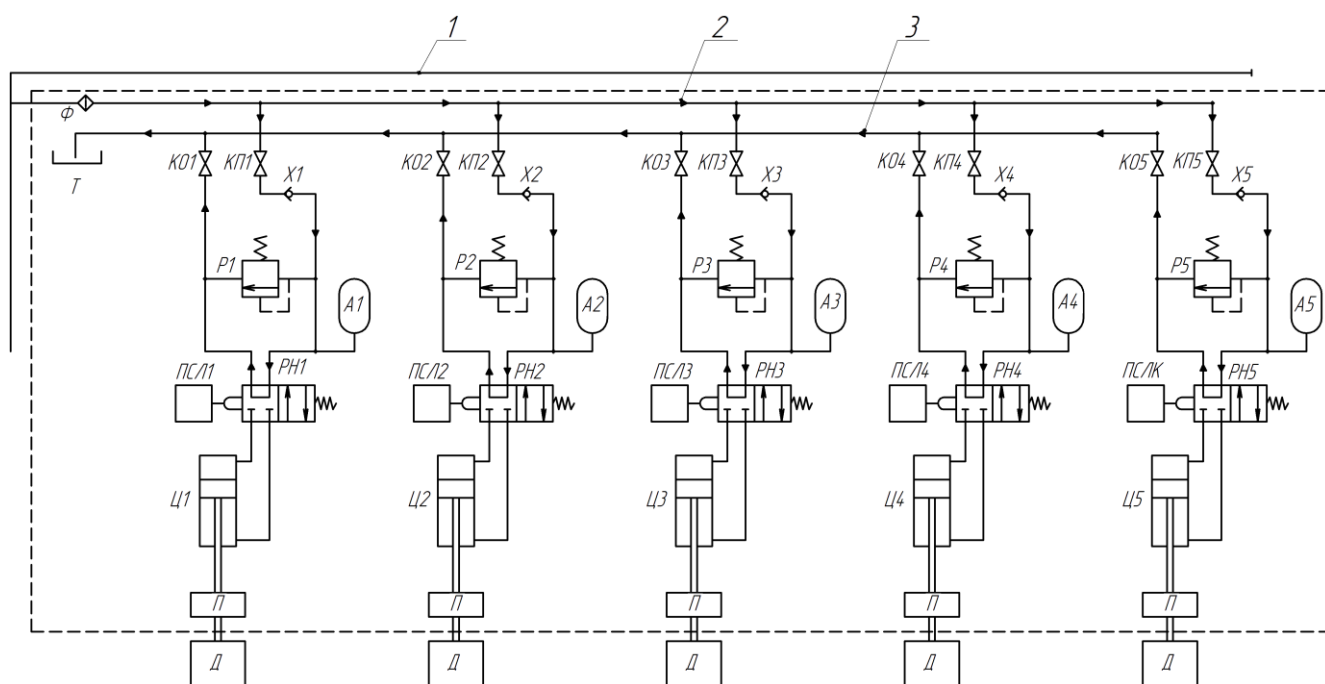


Рисунок 2.10 – Гидравлическая схема комплекта энергооборудования с гидродвигателем возвратно-поступательного действия (с гидроцилиндром): 1 – трубопровод; 2, 3 – гидролинии

Гидравлическая схема с гидроцилиндрами (см. рисунок 2.10) отличается только тем, что преобразует энергию рабочей жидкости в механическое возврат-

но-поступательное движение поршня цилиндра, который соединен с передачей Π движителя Δ опорной тележки секции дождевальная машины [187, 262, 299].

Самой распространенной является схема с прямой гидролинией и сбросом воды из цилиндров (рисунок 2.11), как, например, в системах ДМ «Фрегат» [139, 180, 200].

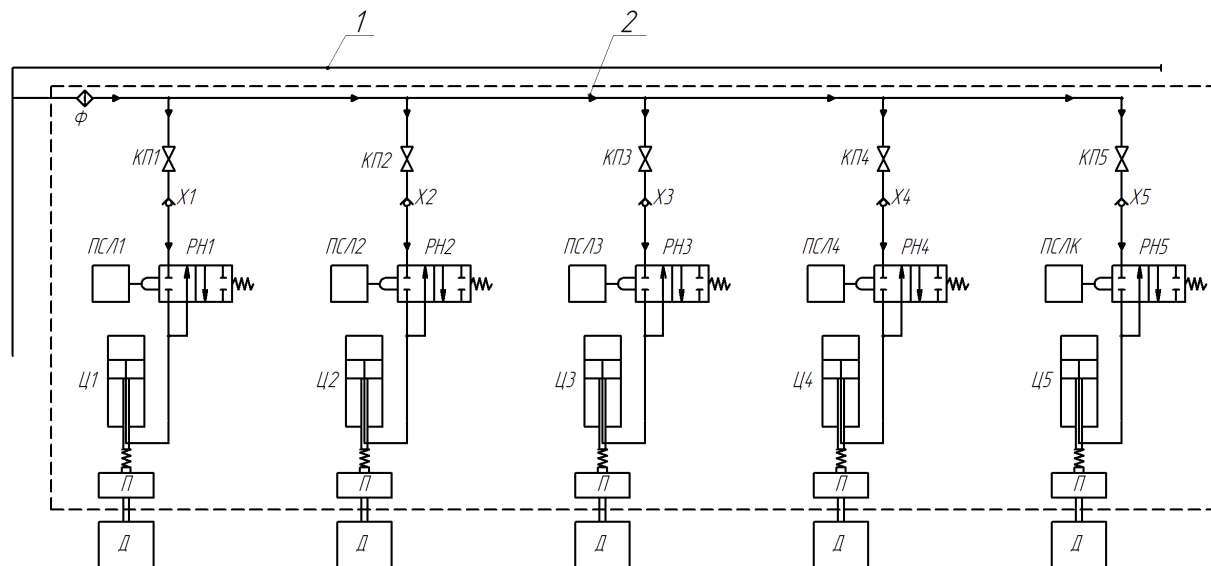


Рисунок 2.11 – Гидравлическая схема комплекта энергооборудования со сбросом рабочей жидкости из гидроцилиндров: 1 – трубопровод; 2 – гидролиния

Система энергоснабжения на механическом приводе $V_{крМ}$ (рисунок 2.12) представляет собой совокупность устройств для передачи механической энергии от источника – двигателя внутреннего сгорания $\Delta ВС$ [183, 188, 262] через предохранительную муфту X и карданный вал к передаче Π движителя Δ .

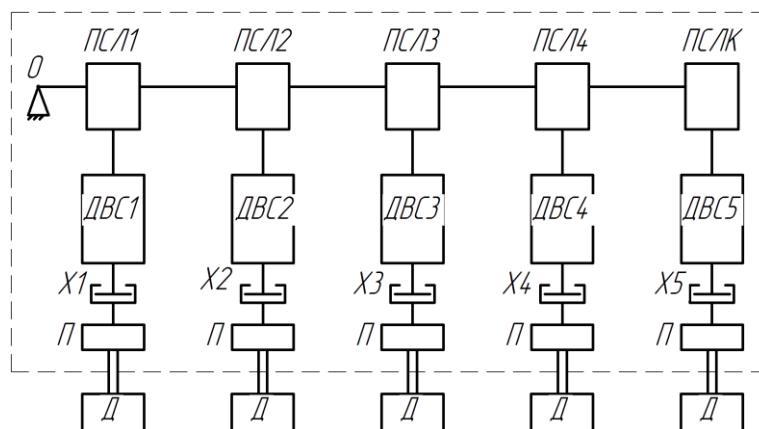


Рисунок 2.12 – Упрощенная механическая схема передачи энергии

Управление включением/отключением *ДВС* осуществляется с помощью прибора синхронизации движения в линию *ПСЛ* посредством механической передачи к блоку запуска и остановки *ДВС* [180, 188].

Комплект энергооборудования на электрическом приводе $V_{крЭ}$ может иметь несколько источников питания (рисунки 2.13, 2.14 и 2.15), централизованный источник – от трансформаторной подстанции, где передача электроэнергии осуществляется по кабельной или воздушной линии (см. рисунок 2.13) сети трехфазного переменного тока напряжением 380/220 В частотой 50 Гц.

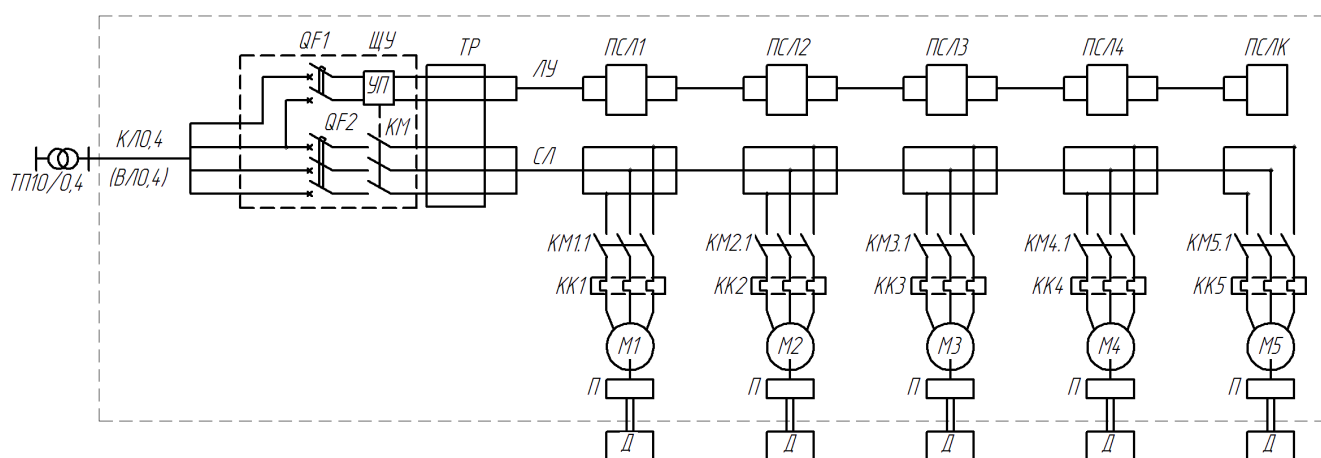


Рисунок 2.13 – Упрощенная электрическая схема системы энергоснабжения с электроприводом и централизованным источником питания от кабельной (воздушной) линии

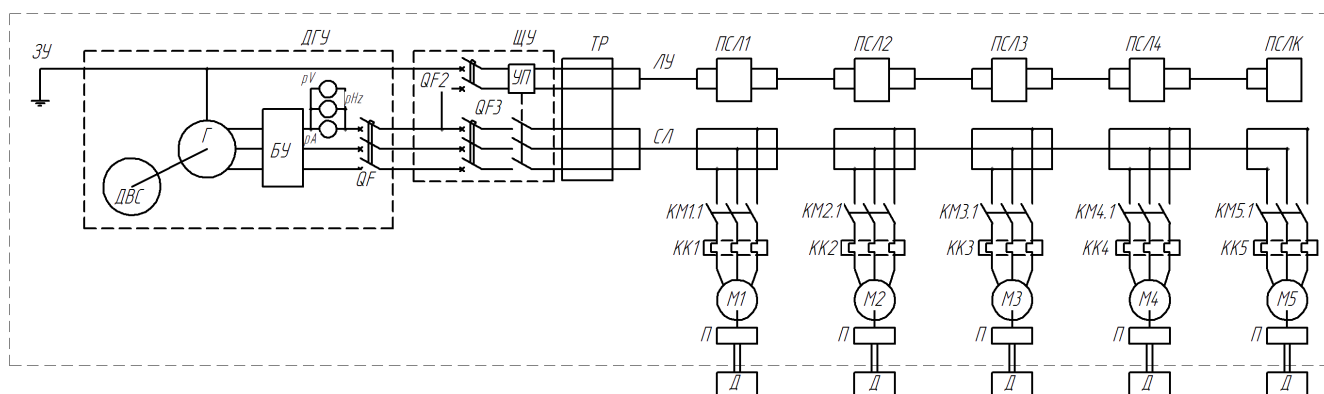


Рисунок 2.14 – Упрощенная электрическая схема системы энергоснабжения с электроприводом и автономным источником питания от переносного генератора (дизельный или бензиновый)

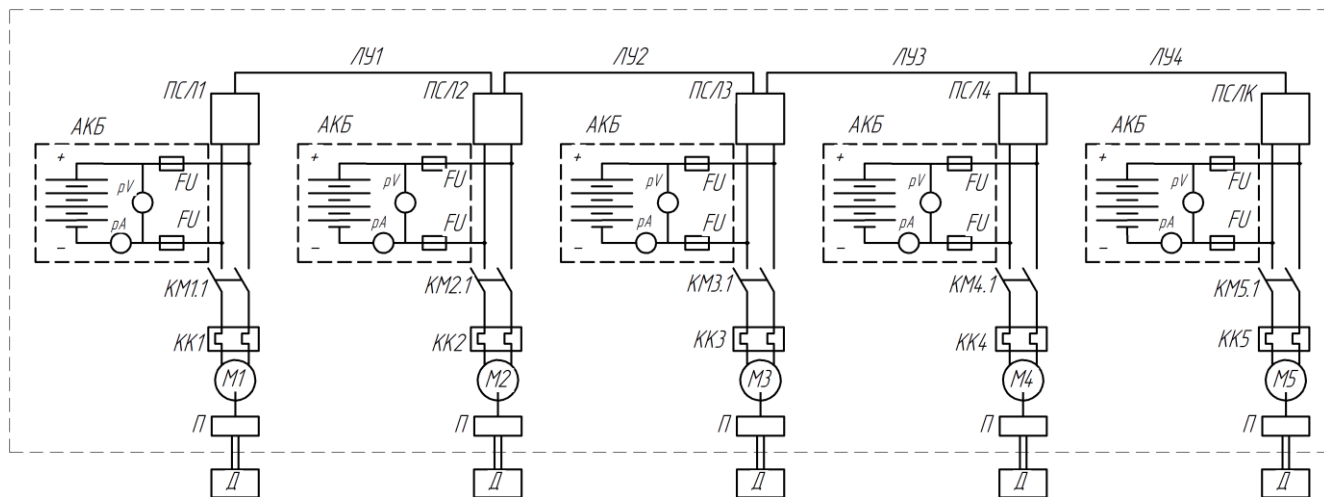


Рисунок 2.15 – Упрощенная электрическая схема системы энергоснабжения с электроприводом и автономным источником питания от аккумуляторных батарей

Питание электродвигателей M осуществляется от трансформаторной подстанции $ТП 10/0,4$ через кабельную линию $КЛ 0,4$ кВ (или воздушную линию $ВЛ 0,4$ кВ) и щит управления $ЩУ$, в котором установлены автоматические выключатели $QF1$ для защиты линии управления $ЛУ$ и $QF2$ для защиты силовой линии $СЛ$. Также имеется устройство управления $УП$ для включения и отключения контактов $КМ$ магнитного пускателя силовой линии питания электроприводов. Магнитный пускатель предназначен для включения/отключения электродвигателя M .

Для защиты двигателя от перегрузки установлено тепловое реле $КК$. Питание катушки осуществляется от линии связи в соответствии с работой прибора синхронизации движения в линию $ПСЛ$. Во избежание обрыва питающего кабеля при круговом закручивании в центре оси вращения дождевальная машины предусмотрен круговой токосъемник $ТР$.

Система питания электрического привода от автономного источника может быть представлена в виде дизельного или бензинового переносного генератора (см. рисунок 2.14) и аккумуляторной батареи (см. рисунок 2.15).

В систему питания от переносного генератора входят блок управления $БУ$ и комплекс измерительной аппаратуры: амперметр pA , вольтметр pV , частотомер pHz . Она предназначена для поддержания напряжения при изменении нагрузки (величины тока и коэффициента мощности электродвигателя).

Выходные параметры генератора соответствуют параметрам сети в виде трехфазного переменного тока с классом напряжения 380/220 В частотой 50 Гц.

Поэтому составные части данного комплекта такие же, как и в системе питания от *КЛ* 0,4 кВ.

Питание от аккумуляторной батареи *АКБ* характеризуется постоянным током. В данной системе питания предусмотрен двигатель постоянного тока *М* (см. рисунок 2.15) [7, 20, 38, 43, 44, 80, 82, 114, 133, 154, 163, 170, 175, 197, 214, 251, 301, 306, 327, 330, 331, 357, 348, 352]. В цепь управления и защиты такого двигателя также входят тепловое реле *КК* и электромагнитное реле *КМ*. Катушка реле *КМ* запитана через линию управления *ЛУ* и осуществляет включение/отключение цепи электродвигателя в соответствии с принципом работы прибора *ПСЛ* [7, 53, 66, 346].

Защита источника *АКБ* представлена в виде плавких вставок *FU*, которые в случае превышения тока в цепи электродвигателя защищают источник от токов короткого замыкания. Контрольно-измерительная аппаратура предназначена для проверки состояния *АКБ* [7, 154, 171, 203, 273, 306, 318].

Кроме указанных элементов представленных систем в их структуру входят вспомогательные устройства крепления оборудования, устройства повышающие безопасность работы с оборудованием, устройства измерения и контроля параметров и прочие устройства.

Оценка функций и качества связей перечисленных систем заключается в подробном описании их структурных, функциональных и функционально-структурных схем [157, 181–184]. Необходимо представить каждую систему в виде моделей: структурных, функциональных и функционально-структурных.

Структурную модель изображают в виде составных элементов, их взаимосвязи и иерархии. Она позволяет определить количество составных элементов и обозначить «скелет» рассматриваемой системы.

Каждая модель устроена по принципу передачи энергии движителю с возможностью регулирования и управления разным количеством степеней свободы. Сравнение различных систем на основе какого-либо одного критерия не даст желаемого результата. Так, например, с развитием технических средств и технологий для электрического привода появилось больше возможностей присоединения новых интеллектуальных систем управления и контроля, но это не означает, что он меньше потребляет энергии, чем гидравлический или механический привод.

Каждый элемент системы характеризуется физико-химическими свойствами, ответственностью, надежностью, нагрузкой и другими качествами. Рассмотрим структурные модели нескольких систем энергоснабжения с учетом того, что любая система должна быть ограничена минимальным и достаточным количеством элементов для выполнения движения опорных тележек.

Структурные модели электрического, гидравлического и механического приводов приведены на рисунках П.1–П1.7 в приложении А.

Система энергоснабжения с гидродвигателем вращательного действия имеет 28 элементов в структурной схеме. Свойства данной системы характеризуются динамическими и статистическими связями, действиями и взаимодействиями друг с другом.

В модель системы гидродвигателя возвратно-поступательного действия входит 29 элементов, в систему механического привода – 21 элемент; электрического с кабельным (воздушным) питанием – 24 (25); электрического с переносным генератором – 30; электрического с аккумуляторным питанием – 21 элемент.

Системный анализ структурных моделей позволяет раскрыть логическую связь элементов, определить количество основных и вспомогательных функций; качество связей и их уровень проявления. Для анализа функций элементов систем применяют различные методы [361, 11, 12, 57, 74, 84, 100, 101], самые распространенные из них – профессиональный анализ, метод «черного ящика», метод сценариев, метод логической цепочки и т. п.

Метод «черного ящика» основан на выявлении причинно-следственных связей входных и выходных данных, а система рассматривается как сложная непознанная структура («черный ящик»). Метод экспертных оценок (профессиональный анализ) опирается на мнение опытных практических работников, экспертов или группы специалистов. Метод сценариев предполагает построение гипотез развития связей сложных систем.

Метод анализа различных систем энергоснабжения (СЭ) по принципу «черного ящика» (рисунок 2.16) позволяет получить обобщенный вид принципов работы системы, но не раскрывает количества связей элементов системы. Наибо-

лее полный анализ функций дает метод логической цепочки, который основан на поэтапном раскрытии всех связей элементов.

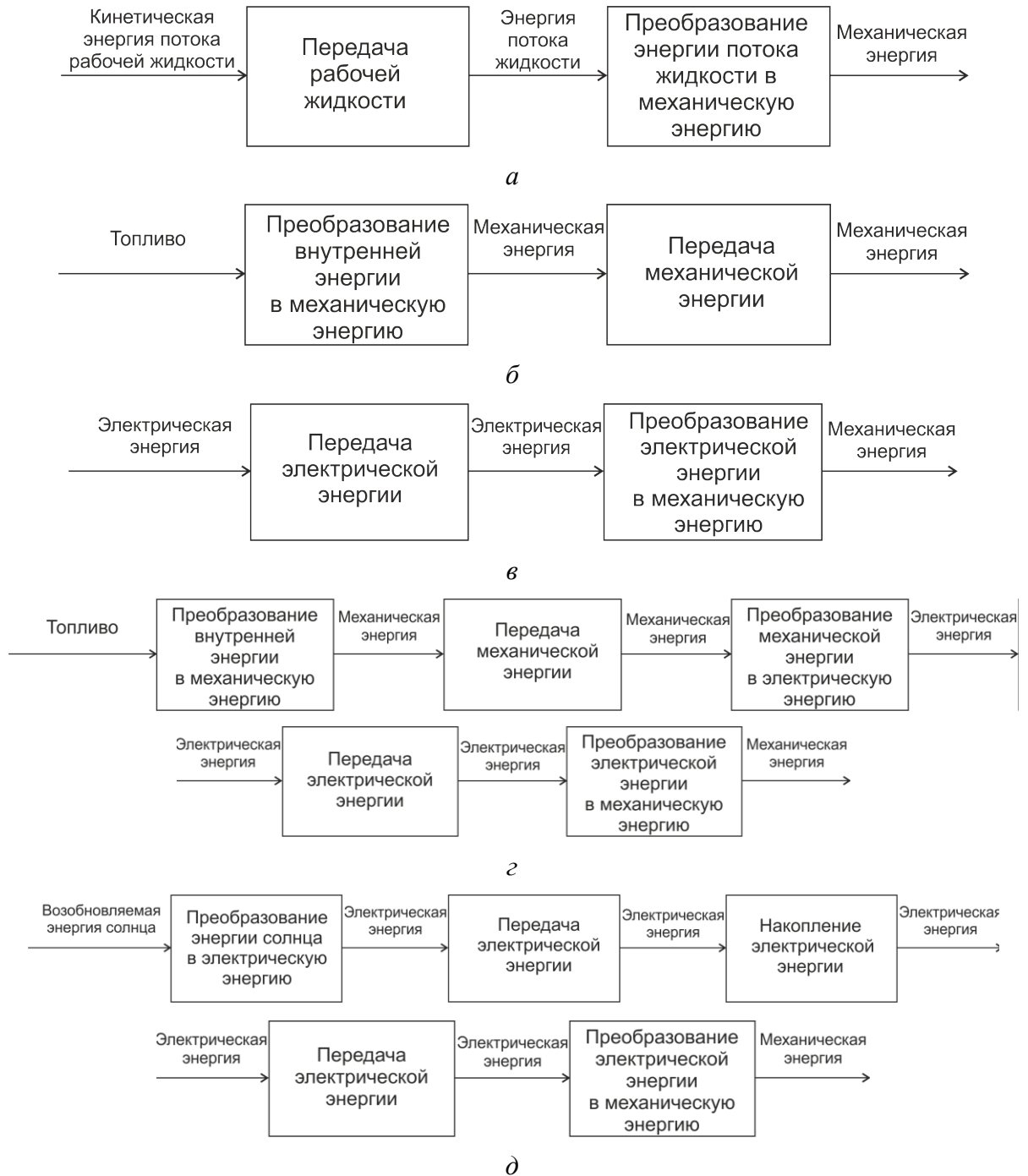


Рисунок 2.16 – Системный анализ функций по методу «черного ящика»:

- а* – для гидравлического привода; *б* – для механического привода;
- в* – для электрического привода с питанием от кабельной (воздушной) линии;
- г* – для электрического двигателя с питанием от переносного генератора;
- д* – для электрического двигателя с питанием от аккумуляторных батарей с солнечными модулями

Рассмотрим применение метода логической цепочки для описания функциональных связей элементов структурных моделей на основе методики FAST

(Function Analysis System Technique) [11, 12, 57, 74, 84, 100, 101], которая заключается в построении диаграмм детерминированной логики. На основе этих диаграмм получают функциональные модели достаточного уровня абстрагирования [157, 170, 278, 295].

Построим диаграммы функций по методике FAST, используя принцип ограничений составных частей (комплексы и комплекты) системы вертикальными линиями. Количество наименьших взаимосвязей в комплексе (комплекте) устанавливаются с помощью способа повторяемой постановки вопросов «Как?» и «Почему?» до тех пор, пока ответ (функциональная связь) не будет исчерпывающим.

Например, для того, чтобы распределить поливную воду по поливной площади дождевальную машину необходимо привести в действие. – КАК? – Подвесить механическую энергию. – КАК? – Преобразовать энергию жидкости в механическую энергию. – КАК? – Передать энергию потока жидкости. – КАК? – Получить энергию потока жидкости.

Перечисленные функции являются основными и обязательными для выполнения главной цели. Взаимосвязанные функции безопасности, управления и т. п. являются функциями более низкого уровня. Путь, по которому происходит выполнение основной функции, называют критическим. Проверку адекватности критического пути выполняют по принципу обратной постановки вопроса «Почему?».

Например, получить энергию потока жидкости. – ПОЧЕМУ? – Чтобы передать энергию потока жидкости на расстояние. – ПОЧЕМУ? – Чтобы преобразовать энергию потока жидкости в механическую энергию. – ПОЧЕМУ? – Чтобы передать механическую энергию движителю ходовой части ДМ. – ПОЧЕМУ? – Чтобы распределить воду по поливной площади. – и т. д.

Постановку вопроса «Когда?» выполняют для каждой основной функции для того, чтобы выявить состав вспомогательных функций обеспечения безопасности, надежности и других обязательных функций.

Диаграммы функций для различных приводов, построенные по методике FAST, приведены на рисунках П1.8–П1.12 приложения А.

По полученным данным диаграмм строят логико-графическое изображение количества взаимосвязей функций объекта исследования в виде графа. Построение графа иерархии функций выполняют на основе полученных основных и

вспомогательных формулировок конкретных функций [295]. Например, главная функция – обеспечить передачу механической энергии двигателю опорной тележки дождевальной машины, а ее составные функции II уровня по иерархии: обеспечить преобразование электрической энергии в механическую; обеспечить передачу электрической энергии и т. п.

Особенностями построения графа функций являются: согласование частных функций с общими функциями системы; содержание выполняемой функции должно отражать конкретную задачу в работе системы и цель ее действия; иерархию по уровням строят до выполнения простейших функций и описывают в виде триады действий типа «вход – преобразование – выход».

Рассмотрим функциональные модели гидравлического, механического и электрического приводов опорных тележек ДМ (рисунки 2.17–2.19), в системах которых помимо главной функции должны быть обеспечены безопасность и удобство обслуживания.

Функции каждой системы можно расширить. Например, контролировать параметры процесса полива в момент выполнения работы: расход поливной воды, режим работы дождевальной машины, геопозицию на карте, влажность почвы, а также дистанционно управлять ими. Такие устройства работают на электрической энергии (электрические измерения, передача данных). Тогда применение электрической энергии в качестве основного источника питания имеет ряд преимуществ по сравнению с гидроприводом и механическим приводом. Поэтому на данном этапе исследования правильно принять необходимые и достаточные функции рассматриваемых вариантов, чтобы адекватно оценить структурно-функциональные свойства с позиции энергетических затрат.

Как видно по структурным и функциональным моделям, а также по упрощенным схемам действия, сборочные единицы представлены в достаточном количестве для выполнения передачи энергии двигателям опорных тележек ДМ.

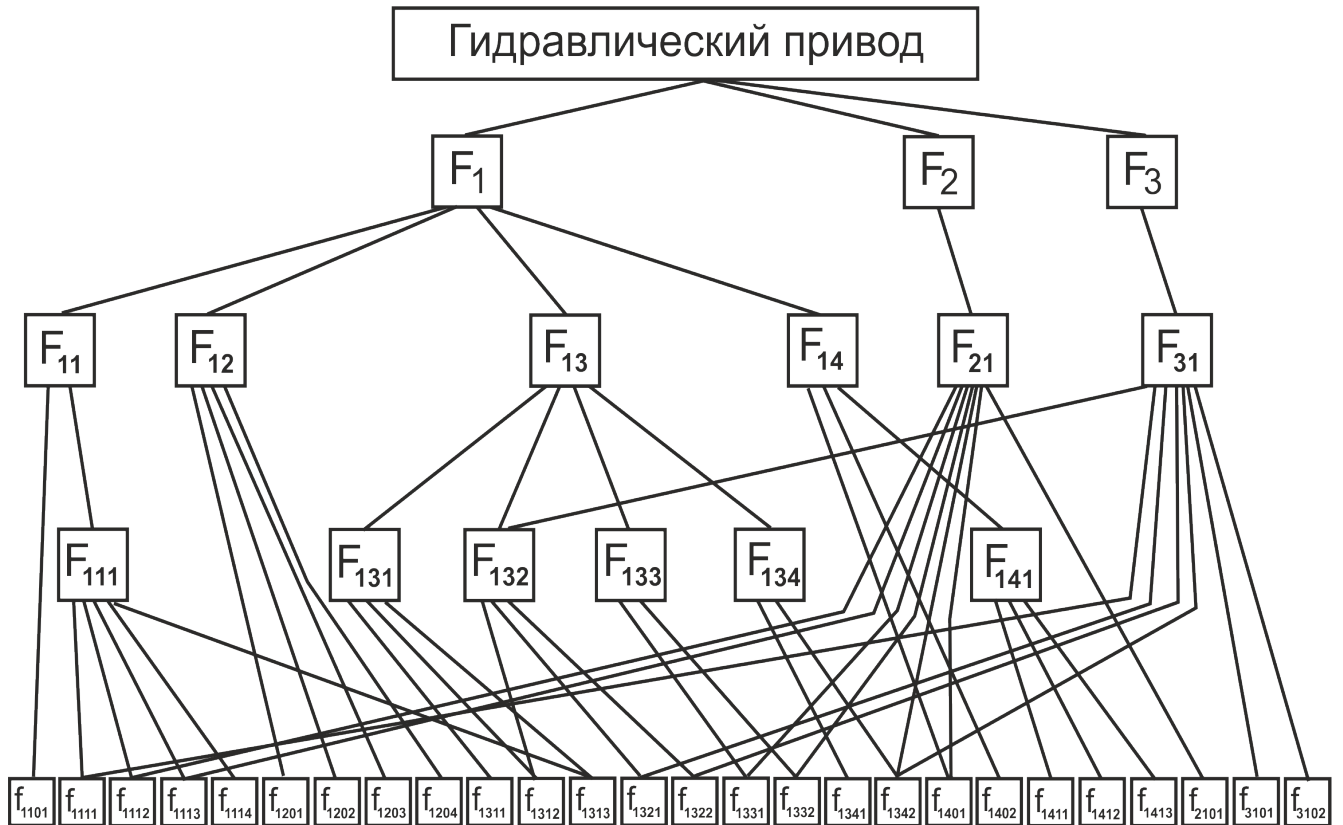


Рисунок 2.17 – Функциональная модель системы энергоснабжения с гидравлическим приводом:

F_1 – обеспечить передачу механической энергии ходовой части ДМ; F_2 – обеспечить безопасность работы системы и окружающей среды; F_3 – обеспечить удобство управления и обслуживания; F_{11} – обеспечить преобразование энергии рабочей жидкости в механическую энергию; F_{12} – обеспечить передачу энергии жидкости; F_{13} – обеспечить управление рабочей жидкостью; F_{14} – принять энергию рабочей жидкости; F_{21} – обеспечить герметичность и безопасность передачи энергии; F_{31} – обеспечить доступ к узлам системы при обслуживании; F_{111} – обеспечить подключение гидродвигателя к ходовой части; F_{131} – обеспечить ручное и автоматическое управление гидродвигателем; F_{132} – обеспечить контроль параметров системы; F_{133} – обеспечить защиту системы рабочей жидкости; F_{134} – обеспечить защиту от излома ДМ; F_{141} – обеспечить хранение рабочей жидкости; f_{1101} – преобразовать энергию жидкости в механическую энергию; f_{1111} – закрепить гидродвигатель; f_{1112} – присоединить гидродвигатель к редуктору; f_{1113} – присоединить редуктор к ходовой части машины; f_{1114} – согласовать параметры передачи; f_{1201} – транспортировать жидкость по системе гидролиний; f_{1202} – распределить рабочую жидкость на каждый гидродвигатель; f_{1203} – закрепить рукава высокого давления; f_{1204} – соединить трубы фланцами сливной и напорной линий; f_{1311} – закрепить гидрораспределитель; f_{1312} – соединить гидрораспределитель с механизмом прибора синхронизации движения в линию; f_{1313} – соединить рукавами гидрораспределитель с гидродвигателем; f_{1321} – контролировать давление жидкости; f_{1322} – контролировать температуру жидкости; f_{1331} – защитить гидролинию клапаном обратного хода жидкости; f_{1332} – защитить рукава высокого давления предохранительным клапаном; f_{1341} – закрепить механизм ПСЛ; f_{1342} – контролировать отклонение перемещения секций по кругу; f_{1401} – очистить рабочую жидкость; f_{1402} – открыть доступ подачи рабочей жидкости; f_{1411} – установить гидроаккумулирующий бак; f_{1412} – соединить гидроаккумулирующий бак со сливной гидролинией; f_{1413} – хранить рабочую жидкость; f_{2101} – закрыть кожухом движущиеся части гидравлического привода; f_{3101} – выполнить герметичность трубопровода; f_{3102} – контролировать дистанционно работу системы

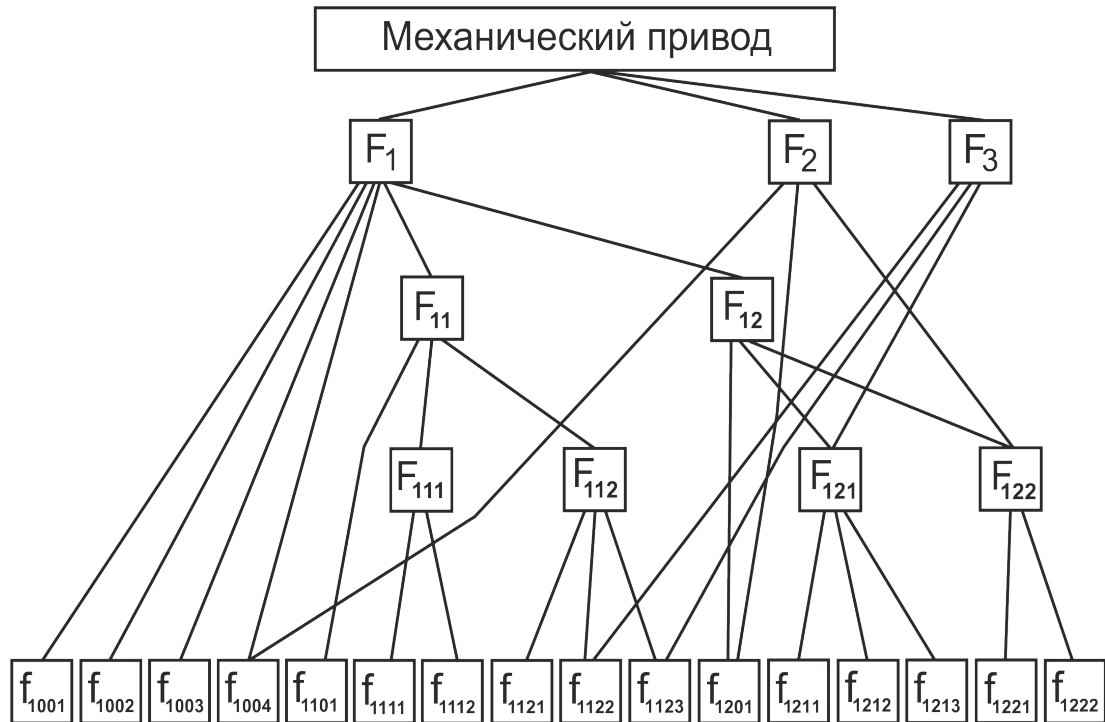


Рисунок 2.18 – Функциональная модель системы энергоснабжения с механическим приводом:
 F_1 – обеспечить передачу механической энергии ходовой части ДМ; F_2 – обеспечить безопасность работы оборудования дождевальная машины; F_3 – обеспечить удобство управления и обслуживания; F_{11} – установить источник механической энергии; F_{12} – обеспечить защиту и управление оборудованием; F_{111} – обеспечить крепление и наладку двигателя внутреннего сгорания; F_{112} – обеспечить комплект двигателя внутреннего сгорания; F_{121} – обеспечить управление ходом дождевальная машины в целом; F_{122} – обеспечить защиту от излома ДМ; f_{1001} – закрепить стойки подшипников; f_{1002} – установить вал передачи крутящего момента двигателя; f_{1003} – присоединить вал к движителю ходовой части ДМ; f_{1004} – закрыть вал кожухом; f_{1101} – подать топливо в ДВС; f_{1111} – закрепить ДВС; f_{1122} – настроить автоматический запуск ДВС; f_{1123} – согласовать запуск с механизмом ПСЛ; f_{1201} – установить фрикционную муфту; f_{1211} – установить управляющий клапан на устройстве запуска ДВС; f_{1212} – присоединить управляющий клапан с механизмом ПСЛ; f_{1213} – установить частотомер и счетчик мото-часов; f_{1221} – закрепить механизм прибора ПСЛ; f_{1222} – присоединить механизм ПСЛ к тросовой системе защиты от излома ДМ через ролики

Помимо основных элементов в структуре имеются обязательные дополнительные элементы, которые способствуют выполнению основной функции, а также повышают надежность работы системы, безопасность работы персонала и т. п. Например, заземляющее устройство в системах с электроприводом не относится к выполнению прямой функции системы, но выполняет требование к безопасности использования системы – защита персонала от поражения электрическим током.

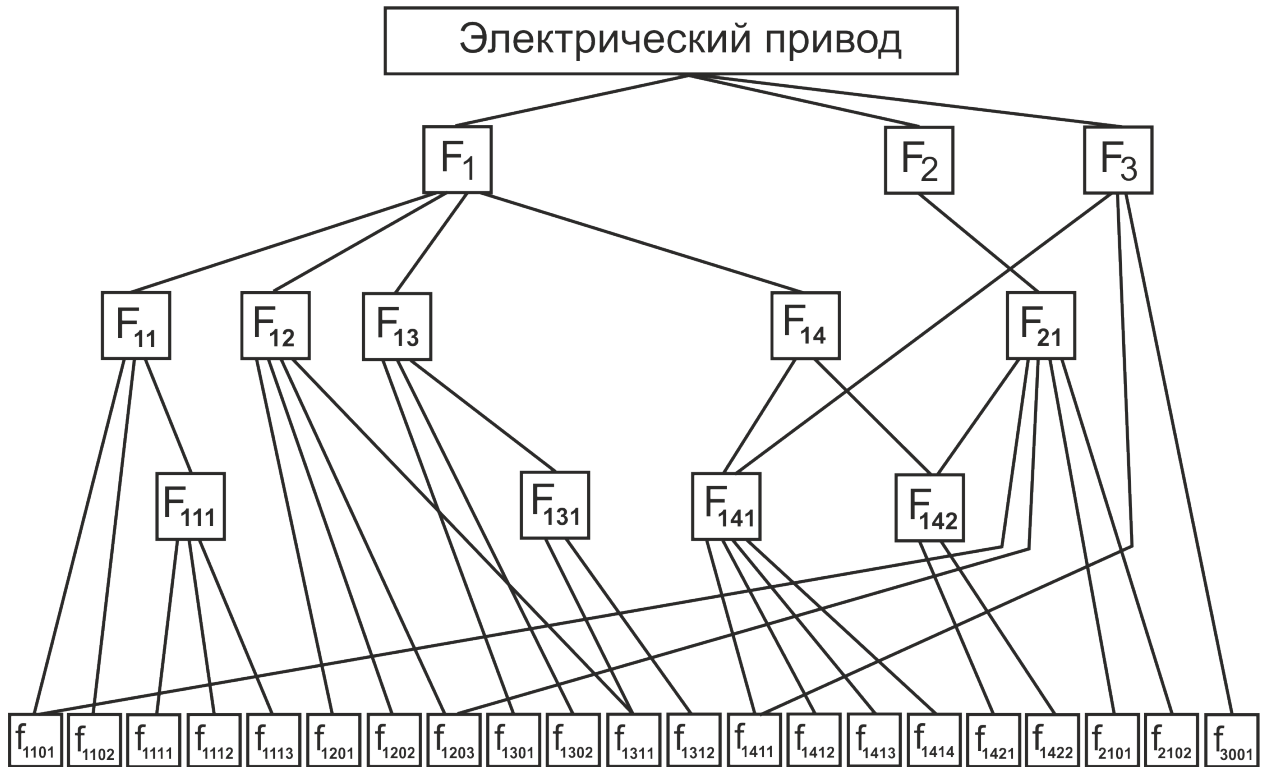


Рисунок 2.19 – Функциональная модель системы энергоснабжения с электрическим приводом и с питанием от аккумуляторной батареи: F_1 – обеспечить передачу механической энергии ходовой части ДМ; F_2 – обеспечить безопасность работы системы и окружающей среды; F_3 – обеспечить удобство управления и обслуживания; F_{11} – обеспечить источник электрической энергии; F_{12} – обеспечить преобразование электроэнергии в механическую энергию; F_{13} – обеспечить передачу электрической энергии; F_{14} – обеспечить защиту и управление электрооборудованием; F_{21} – обеспечить защиту персонала от поражения электрическим током; F_{111} – обеспечить зарядку аккумуляторных батарей; F_{131} – обеспечить устройство силовой и вторичной сети; F_{141} – обеспечить управление электроприводом и дождевальными машинами в целом; F_{142} – обеспечить защиту от токов короткого замыкания и перегрузок; f_{1101} – установить герметичный щит; f_{1102} – закрепить аккумуляторные батареи; f_{1111} – закрепить солнечные модули; f_{1112} – подключить контроллер заряда АКБ; f_{1113} – установить режимы зарядки АКБ; f_{1201} – установить электродвигатель с редуктором; f_{1202} – передать крутящий момент от электродвигателя к движителю ходовой части ДМ; f_{1203} – закрыть движущиеся части кожухом; f_{1301} – передать электроэнергию; f_{1302} – закрепить кабели и защитить их от механических повреждений; f_{1311} – согласовать пропускную способность сети с нагрузкой; f_{1312} – обеспечить работу схемы и коммутацию вторичных сетей; f_{1411} – установить блок управления электроприводом; f_{1412} – собрать и настроить схему работы привода через ПСЛ; f_{1413} – обеспечить схему управления режимами полива; f_{1414} – подключить приборы контроля параметров цепи (тока, напряжения, мощности); f_{1421} – обеспечить защиту силовой сети от токов короткого замыкания и перегрузок; f_{1422} – обеспечить защиту вторичной сети от токов короткого замыкания и перегрузок; f_{2101} – выполнить заземление металлоконструкций машины; f_{2102} – установить защиту от поражения электрическим током при прямом прикосновении (устройство защитного отключения – УЗО); f_{3001} – обеспечить возможность дистанционного обслуживания

Следующим этапом синтеза является обозначение участия того или иного элемента структурной модели в выполнении конкретной функции функциональ-

ной модели. Сведем данные графов в таблицы 2.2–2.8 функционально-структурные модели указанных вариантов.

Таблица 2.2 – Функционально-структурная модель системы энергоснабжения гидропривода с гидродвигателем вращательного действия

| Элемент системы (сборочная единица) | F_1 | | | | | | | | F_2 | F_3 | | |
|--|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|--|-----------|
| | F_{11} | | F_{12} | F_{13} | | | | F_{14} | | F_{31} | | |
| | | F_{111} | | F_{131} | F_{132} | F_{133} | F_{134} | | F_{141} | F_{21} | | F_{132} |
| Рабочая жидкость | + | | | | | | | + | | | | |
| Площадка для гидроаккумулятора | + | | | | | | | | + | | | |
| Гидроаккумулятор (бак) | + | | | | | | | | + | | | |
| Фильтр | + | | | | | | | + | | | | |
| Гидродвигатель | | + | | | | | | | | | | |
| Передача | | + | | | | | | | | | | |
| Площадка для гидродвигателя | | + | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | + | | | | | | | | | | |
| Крепеж трубопровода | | | + | | | | | | | + | | |
| Отводы | | | + | | | | | | | | | |
| Фланцы | | | + | | | | | | | + | | |
| Труба | | | + | | | | | | | | | |
| Рукава высокого давления | | | + | | | | | | | + | | |
| Предохранительный клапан | | | | + | | + | | | | | | |
| Клапан обратного хода | | | | + | | + | | | | + | | |
| Обратный клапан | | | | | | + | | | | | | |
| Манометр | | | | | + | | | | | | | + |
| Термометр | | | | | + | | | | | | | + |
| Прямой клапан | | | | + | | | | | | | | |
| Гидрораспределитель | | | | + | | | | | | | | |
| Площадка для крепления прибора ПСЛ | | | | | | | + | | | | | + |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | + | | | | | + |
| Кулачок | | | | + | | | + | | | | | |
| Кожух для механизма | | | | | | + | | | | + | | |
| Ролики | | | | | | | + | | | | | |
| Крепление роликов | | | | | | | + | | | | | |
| Тросс | | | | | | | + | | | | | |
| Крепление тросса | | | | | | | + | | | | | |

| Элемент системы (сборочная единица) | F_1 | | | | | | F_2 | F_3 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
| | F_{11} | | F_{12} | | F_{122} | F_{121} | | |
| | F_{111} | F_{112} | F_{121} | F_{122} | | | | |
| Соединительная муфта | + | | | | | | + | |
| Кожух передачи | + | | | | | | + | |
| Фрикционная предохранительная муфта | + | | | + | | | + | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | + | + | | |
| Управляющий клапан | | | | | + | | | |
| Частотомер | | | + | | | | | + |
| Счетчик моточасов | | | + | | | | | + |
| Ролики | | | | | | + | | |
| Крепеж роликов | | | | | | + | | |
| Тросс | | | | | | + | | |
| Крепеж троса | | | | | | + | | |

Таблица 2.5 – Функционально-структурная модель системы энергоснабжения электропривода с питанием от кабельной линии

| Элемент системы (сборочная единица) | F_1 | | | | | | F_2 | F_3 |
|---|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | F_{11} | F_{12} | F_{13} | F_{14} | | F_{21} | F_{141} | |
| | F_{111} | | F_{131} | F_{141} | F_{142} | | | F_{142} |
| Кабельная линия | + | | | | | | | |
| Траншея | | + | | | | | | |
| Прокладочный кирпич | | + | | | | | | |
| Вводно-распределительный щит | + | | | | | | | |
| Электродвигатель переменного тока | | + | | | | | | |
| Площадка для двигателя | | + | | | | | | |
| Передача | | + | | | | | | |
| Кожух передачи | | + | | | | + | | |
| Токосъемник | | | + | | | | | |
| Клеммная коробка | | | + | | | | | |
| Кабель линии управления | | | | + | | | | |
| Силовой кабель | | | | + | | | | |
| Защитный рукав и крепеж кабеля | | | | + | | + | | |
| Автоматический выключатель линии управления | | | | | + | + | | |
| Автоматический выключатель силовой линии | | | | | + | + | | |
| Тепловое реле | | | | | + | + | | |
| Главный магнитный пускатель | | | | | + | | + | |
| Счетчик электроэнергии | | | | | | | + | |
| Амперметр | | | | | | | + | |
| Вольтметр | | | | | | | + | |
| Магнитный пускатель электродвигателя | | | | | + | | | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | + | | + | |
| Управляющий контакт | | | | | + | | + | |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | + | + | | |

Таблица 2.6 – Функционально-структурная модель системы энергоснабжения электропривода с питанием от воздушной линии

| Элемент системы (сборочная единица) | F_1 | | | | | | F_2 | F_3 | |
|---|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|---|
| | F_{11} | F_{12} | F_{13} | F_{14} | | F_{21} | | | |
| | F_{111} | | F_{131} | F_{141} | F_{142} | F_{142} | F_{141} | | |
| Воздушная линия (ВЛ) | + | | | | | | | | |
| Опоры | | + | | | | | | | |
| Арматура крепления ВЛ | | + | | | | | | | |
| Вводно-распределительный щит | + | | | | | | | | |
| Электродвигатель переменного тока | | | + | | | | | | |
| Площадка для двигателя | | | + | | | | | | |
| Передача | | | + | | | | | | |
| Кожух передачи | | | + | | | | + | | |
| Токосъемник | | | | + | | | | | |
| Клеммная коробка | | | | + | | | | | |
| Кабель линии управления | | | | | + | | | | |
| Силовой кабель | | | | | + | | | | |
| Защитный рукав и крепеж кабеля | | | | | + | | + | | |
| Автоматический выключатель линии управления | | | | | | + | | + | |
| Автоматический выключатель силовой линии | | | | | | + | | + | |
| Тепловое реле | | | | | | + | | + | |
| Главный магнитный пускатель | | | | | | + | | | + |
| Счетчик электроэнергии | | | | | | | | | + |
| Амперметр | | | | | | | | | + |
| Вольтметр | | | | | | | | | + |
| Магнитный пускатель электродвигателя | | | | | | + | | | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | + | | | + |
| Управляющий контакт | | | | | | + | | | + |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | + | + | | |

В таблицах 2.2–2.8 связь функции с элементом системы (сборочной единицей) обозначена в виде знака «+». В выполнении одной функции может участвовать несколько сборочных единиц. Также в выполнении нескольких функций может участвовать несколько элементов.

Детальный анализ функционально-структурной модели каждой системы показывает связь сборочных единиц в системе. Рассматриваемые системы имеют существенные различия, поэтому оценить сложность преобразования энергий возможно путем определения функциональной эффективности каждой системы [295]. По разным данным [157, 170, 278, 295], систему можно оценить по степени актуализации, сосредоточения, гибкости и совместимости ее составных элемен-

тов. Для этого необходимо составить матрицу «элемент – элемент» и оценить количество явных и косвенных связей, прямых и обратных действий относительно главной цели системы, оценить вредные, нейтральные и полезные связи.

Таблица 2.7 – Функционально-структурная модель системы энергоснабжения электропривода с питанием от переносного генератора

| Элемент системы (сборочная единица) | F_1 | | | | | | F_2 | | F_3 | |
|---|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------|-----------|
| | F_{11} | | F_{12} | F_{13} | | F_{14} | | F_{21} | | F_{141} |
| | | F_{111} | | F_{131} | F_{141} | F_{142} | F_{142} | | | |
| Топливо | + | | | | | | | | | |
| Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) | | + | | | | | | | | + |
| Устройство запуска и остановки ДВС | | + | | | | | | | | |
| Аккумуляторная батарея | | + | | | | | | | | |
| Синхронный генератор | | + | | | | | | | | |
| Блок управления генератором | | + | | | | + | | | | |
| Вольтметр | | + | | | | | | | | + |
| Амперметр | | + | | | | | | | | + |
| Частотомер | | + | | | | | | | | + |
| Вводно-распределительный щит | + | | | | | | | | | |
| Электродвигатель переменного тока | | | + | | | | | | | |
| Площадка для двигателя | | | + | | | | | | | |
| Передача | | | + | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | + | | | | + | | | |
| Токосъемник | | | | + | | | | | | |
| Клеммная коробка | | | | + | | | | | | |
| Кабель линии управления | | | | | + | | | | | |
| Силовой кабель | | | | | + | | | | | |
| Защитный рукав и крепеж кабеля | | | | | + | | + | | | |
| Автоматический выключатель линии управления | | | | | | | + | + | | |
| Автоматический выключатель силовой линии | | | | | | | + | + | | |
| Тепловое реле | | | | | | | + | + | | |
| Главный магнитный пускатель | | | | | | + | | | | + |
| Счетчик электроэнергии | | | | | | | | | | + |
| Амперметр | | | | | | | | | | + |
| Вольтметр | | | | | | | | | | + |
| Магнитный пускатель электродвигателя | | | | | | + | | | | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | + | | | | + |
| Управляющий контакт | | | | | | + | | | | + |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | + | + | | | |

Таблица 2.8 – Функционально-структурная модель системы энергоснабжения электропривода с питанием от аккумуляторных батарей

| Элемент системы (сборочная единица) | F_1 | | | | | | F_2 | F_3 | |
|--|-----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | F_{11} | F_{12} | F_{13} | F_{14} | | F_{21} | F_{141} | F_{142} | |
| | F_{111} | | | F_{131} | F_{141} | | | | F_{142} |
| Аккумуляторная батарея | + | | | | | | | | |
| Возобновляемый источник энергии | | + | | | | | | | |
| Контроллер заряда | | + | | | | | | | |
| Вольтметр | + | | | | | | | | + |
| Амперметр | + | | | | | | | | + |
| Вводно-распределительный герметичный щит | + | | | | | | + | | |
| Электродвигатель постоянного тока | | | + | | | | | | |
| Площадка для двигателя | | | + | | | | | | |
| Передача | | | + | | | | | | |
| Кожух передачи | | | + | | | | + | | |
| Клеммная коробка | | | | + | | | | | |
| Кабель линии управления | | | | | + | | | | |
| Силовой кабель | | | | | + | | | | |
| Плавкий предохранитель линии управления | | | | | | + | | + | |
| Плавкий предохранитель силовой линии | | | | | | + | | + | |
| Тепловое реле | | | | | | + | | + | |
| Переключатель режима работы | | | | | | + | | + | |
| Управляющий контакт | | | | | | + | | + | |
| Реле управления | | | | | | + | | | + |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | + | | | + |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | + | | + | |

В таблицах 2.9–2.15 представлены матрицы связей элементов рассматриваемых систем, где использованы следующие обозначения: Я – явная контактная связь (физический контакт); К – косвенный контакт (воздействия); «+» – полезные связи; «±» – нейтральные связи; П – прямые действия; О – обратные действия; С – согласованные действия. При этом в матрице выделены связи подсистем, т. е. комплексов рассматриваемой системы (например, комплекс передачи электроэнергии и комплекс преобразования электроэнергии).

На основе матриц определяют функциональную эффективность системы через коэффициенты актуализации, сосредоточения, гибкости и совместимости. Данные коэффициенты делятся на составляющие.

Таблица 2.9 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ гидропривода с гидродвигателем вращательного действия

| Элемент системы (сборочная единица) | Рабочая жидкость | Площадка для гидро-аккумулятора | Гидроаккумулятор (бак) | Фильтр | Гидродвигатель | Передача | Площадка для гидро-двигателя | Кожух передачи | Крепеж трубопровода | Отводы | Фланцы | Труба | Рукава высокого давления | Предохранительный клапан | Клапан обратного хода | Обратный клапан | Манометр | Термометр | Прямой клапан | Гидрораспределитель | Площадка для крепления прибора ПСЛ | Механизм прибора ПСЛ | Кулачок | Кожух для механизма | Ролики | Крепление роликов | Трос | Крепление троса | |
|--|------------------|---------------------------------|------------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------------------|----------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|----------|-----------|---------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|---------|---------------------|---------|-------------------|---------|-----------------|--|
| Рабочая жидкость | | | ОК (+) пя (-) | пя (+) оя (-) | оя (+) | | | | ОК (+) оя (-) | оя (+) оя (-) | оя (+) оя (-) | оя (+) оя (-) | оя (+) оя (-) | оя (-) | оя (+) | оя (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | | | | | | | | |
| Площадка для гидроаккумулятора | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гидроаккумулятор (бак) | ОК (+) оя (+) | | | ПК (+) | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | ПКс (+) | | | | | | | | | | | | | | |
| Фильтр | пя (+) | | ОК (+) | | ОК (+) | | | | | | | ОК (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гидродвигатель | пя (+) | | | ПК (+) | | ОЯс (+) оя (+) | | | | | | оя (+) | пя (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОК (+) | | ПЯс (+) | | | | | | | | |
| Передача | | | | | ПЯс (+) | | | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Площадка для гидродвигателя | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Крепеж трубопровода | ПК (+) | | | | | | | | | оя (+) | пя (+) | пя (+) | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Отводы | пя (+) | | | | | | | | | оя (+) | | ПЯс (+) | ПЯс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фланцы | пя (+) | | оя (+) | | | | | | | оя (+) | | ПЯс (+) | ПЯс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Труба | пя (+) | | оя (+) | ПК (+) | пя (+) | | | | оя (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | ПЯс (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОК (+) | ПЯс (+) | | | | | | | | | |
| Рукава высокого давления | пя (+) | | | | оя (+) | | | | оя (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | | ОКС (+) | ОКС (+) | ПК (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ПК (+) | ПЯс (+) | | | | | | | | | |
| Предохранительный клапан | пя (+) | | | | ПК (+) | | | | | | | ПК (+) | ПКс (+) | | | | ОКС (+) | | ПК (+) | ПЯс (+) | | | | | | | | | |
| Клапан обратного хода | пя (+) | | ОКС (+) | | ПК (+) | | | | | | | ПК (+) | ПКс (+) | | | | ОКС (+) | ОКС (+) | | ОКС (+) | | | | | | | | | |
| Обратный клапан | пя (+) | | | | ПК (+) | | | | | | | ПК (+) | ОК (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Манометр | ПЯс (+) | | | | ПКс (+) | | | | | | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | | | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | | | | | | | | | |
| Термометр | ПЯс (+) | | | | ПКс (+) | | | | | | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | ПКс (+) | | | ОКС (+) | ОКС (+) | | | | | | | | | | |
| Прямой клапан | пя (+) | | | | ПК (+) | | | | | | ПК (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОК (+) | | | ОКС (+) | | | | | | | | | | | | |
| Гидрораспределитель | пя (+) | | | | ПЯс (+) | | | | | | ОЯс (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | ПКс (+) | | ОКС (+) | | | | | | | | | | | | |
| Площадка для крепления прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯс (+) | ПЯс (+) | | | | | | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОКС (+) | оя (+) | ПЯс (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | | ПЯс (+) | | |
| Кулачок | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯс (+) | | ПЯс (+) | | | | ПЯс (+) | | |
| Кожух для механизма | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯс (+) | | | | | | | |
| Ролики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯс (+) | ПЯс (+) | | |
| Крепление роликов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯс (+) | | | | |
| Трос | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯс (+) | ОЯс (+) | ОЯс (+) | | | ОЯс (+) | ПЯс (+) | |
| Крепление троса | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯс (+) | | | |

Таблица 2.10 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ гидропривода с гидроцилиндром

| Элемент системы (сборочная единица) | Рабочая жидкость | Площадка для гидроаккумулятора | Гидроаккумулятор (бак) | Фильтр | Гидроцилиндр | Передача | Площадка для гидроцилиндра | Кожух передачи | Механизм эксцентрика | Крепеж трубопровода | Отводы | Фланцы | Труба | Рукава высокого давления | Предохранительный клапан | Клапан обратного хода | Обратный клапан | Манометр | Термометр | Прямой клапан | Гидрораспределитель | Площадка для крепления прибора ПСЛ | Механизм прибора ПСЛ | Кулачок | Кожух для механизма | Ролики | Крепление роликов | Трос | Крепление троса |
|--|------------------|--------------------------------|------------------------|--------|--------------|----------|----------------------------|----------------|----------------------|---------------------|---------|---------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|----------|-----------|---------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|---------|---------------------|--------|-------------------|---------|-----------------|
| Рабочая жидкость | | | ОК (+) | ПЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | ОК (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | | | | |
| Площадка для гидроаккумулятора | | | ПЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гидроаккумулятор (бак) | ПК (+) | ОЯ (+) | | ПК (+) | | | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | | | ПКС (+) | | | | | | | | | | | | | |
| Фильтр | ОЯ (+) | | ОК (+) | | ОК (+) | | | | | | | | ОК (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гидроцилиндр | ПЯ (+) | | | ПК (+) | | ОЯС (+) | ОЯ (+) | | ПЯС (+) | | | | ОЯ (+) | ПЯ (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОК (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | |
| Передача | | | | | ПЯС (+) | | | ОЯ (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Площадка для гидроцилиндра | | | | | ПЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | ПЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Механизм эксцентрика | | | | | ОЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Крепеж трубопровода | ПК (+) | | | | | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | ПЯ (+) | ПЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Отводы | ПЯ (+) | | | | | | | | | ОЯ (+) | | | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фланцы | ПЯ (+) | | ОЯ (+) | | | | | | | ОЯ (+) | | | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Труба | ПЯ (+) | | ОЯ (+) | ПК (+) | ПЯ (+) | | | | | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ПЯС (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОК (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | |
| Рукава высокого давления | ПЯ (+) | | | | ОЯ (+) | | | | | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | | ОКС (+) | ОКС (+) | ПК (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ПК (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | |
| Предохранительный клапан | ПЯ (+) | | | | ПК (+) | | | | | | | | ПК (+) | ПКС (+) | | | | ОКС (+) | | ПК (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | |
| Клапан обратного хода | ПЯ (+) | | ОКС (+) | | ПК (+) | | | | | | | | ПК (+) | ПКС (+) | | | | ОКС (+) | ОКС (+) | | ОКС (+) | | | | | | | | |
| Обратный клапан | ПЯ (+) | | | | ПК (+) | | | | | | | | ПК (+) | ОК (+) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Манометр | ПЯС (+) | | | | ПКС (+) | | | | | | | | ПКС (+) | ПКС (+) | ПКС (+) | ПКС (+) | | | ПКС (+) | ПКС (+) | ПКС (+) | | | | | | | | |
| Термометр | ПЯС (+) | | | | ПКС (+) | | | | | | | | ПКС (+) | ПКС (+) | ПКС (+) | | | ОКС (+) | | | | | | | | | | | |
| Прямой клапан | ПЯ (+) | | | | ПК (+) | | | | | | | | ПК (+) | ОК (+) | ОК (+) | | | ОКС (+) | | | | | | | | | | | |
| Гидрораспределитель | ПЯ (+) | | | | ПЯС (+) | | | | | | | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ПКС (+) | | ОКС (+) | | | | | | ПКС (+) | ПЯС (+) | | | | |
| Площадка для крепления прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯ (+) | | | | | | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОКС (+) | ОЯ (+) | | ОЯС (+) | ОЯ (+) | | | ПЯС (+) | ПЯС (+) |
| Кулачок | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯС (+) | | ПЯС (+) | | | | | | |
| Кожух для механизма | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯ (+) | | | | | | | | |
| Ролики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯ (+) | ПЯ (+) | |
| Крепление роликов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | |
| Трос | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | | | ОЯ (+) | | ПЯ (+) |
| Крепление троса | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯ (+) | ОЯ (+) | |

Таблица 2.11 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ механического привода

| Элемент системы (сборочная единица) | Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) | Устройство запуска и остановки | Аккумуляторная батарея | Топливо | Площадка для ДВС | Крепеж | Устройство центрирования | Вал | Подшипники | Стойки подшипников | Передача | Соединительная муфта | Кожух передачи | Фрикционная предохранительная муфта | Механизм прибора ПСЛ | Управляющий клапан | Частотомер | Счетчик моточасов | Ролики | Крепеж роликов | Трос | Крепеж троса |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---------|------------------|--------|--------------------------|---------|------------|--------------------|----------|----------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|------------|-------------------|--------|----------------|---------|--------------|
| Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) | | пяс (+) | | пяс (+) | оя (+) | оя (+) | оя (+) | оя (+) | ок (+) | ок (+) | оя (+) | оя (+) | | ок (+) | | | оя (+) | оя (+) | | | | |
| Устройство запуска и остановки | оя (+) | | пяс (+) | ок (+) | | | | | | | | | | | пкс (+) | пяс (+) | | | | | | |
| Аккумуляторная батарея | | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Топливо | оя (+) | пкс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Площадка для ДВС | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Крепеж | пяс (+) | | | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Устройство центрирования | пяс (+) | | | | | | | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | |
| Вал | пяс (+) | | | | | | пяс (+) | | пяс (+) | пк (+) | оя (+) | оя (+) | | оя (+) | | | | | | | | |
| Подшипники | пяс (+) | | | | | | | оя (+) | | пяс (+) | | | | | | | | | | | | |
| Стойки подшипников | пяс (+) | | | | | | | ок (+) | оя (+) | | | | | | | | | | | | | |
| Передача | пяс (+) | | | | | | | пяс (+) | | | | оя (+) | оя (+) | | | | ок (+) | | | | | |
| Соединительная муфта | пяс (+) | | | | | | | пяс (+) | | | пяс (+) | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | | | |
| Фрикционная предохранительная муфта | пкс (+) | | | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | ок (+) | | | | | |
| Механизм прибора ПСЛ | | ок (+) | | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | | пяс (+) | |
| Управляющий клапан | | оя (+) | | | | | | | | | | | | | оя (+) | | | | | | | |
| Частотомер | пяс (+) | | | | | | | | | | пкс (+) | | | пкс (+) | | | | | | | | |
| Счетчик моточасов | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ролики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | оя (+) | пяс (+) |
| Крепеж роликов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | | |
| Трос | | | | | | | | | | | | | | | оя (+) | | | | | оя (+) | | пяс (+) |
| Крепеж троса | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | оя (+) | |

Таблица 2.12 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ электропривода с питанием от кабельной линии

| Элемент системы (сборочная единица) | Кабельная линия | Траншея | Прокладочный кирпич | Вводно-распределительный щит | Электродвигатель переменного тока | Площадка для двигателя | Передача | Кожух передачи | Токосъемник | Клеммная коробка | Кабель линии управления | Силовой кабель | Защитный рукав и крепеж кабеля | Автоматический выключатель линии управления | Автоматический выключатель силовой линии | Тепловое реле | Главный магнитный пускатель | Счетчик электроэнергии | Амперметр | Вольтметр | Магнитный пускатель электродвигателя | Механизм прибора ПСЛ | Управляющий контакт | Кожух механизма прибора ПСЛ |
|---|-----------------|---------|---------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------|----------------|-------------|------------------|-------------------------|----------------|--------------------------------|---|--|---------------|-----------------------------|------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Кабельная линия | ОЯ (+) | | | | | | | | ОКС (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОЯС (+) | ОЯ (-) | | | | | ОКС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | | | | |
| Траншея | ПЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Прокладочный кирпич | ПЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Вводно-распределительный щит | ПЯ (+) | | | ОЯ (+) | | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | | | | | | ПК (+) | ПК (+) | ПК (+) | | | | |
| Электродвигатель переменного тока | ПЯ (+) | | | | ОЯ (+) | ОЯС (+) | | | ОК (+) | ОК (+) | ОК (+) | ОЯС (+) | | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОЯС (+) | | | |
| Площадка для двигателя | | | | | ПЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Передача | | | | | ПЯС (+) | | ОЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | | ПЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Токосъемник | ПКС (+) | | | | ПК (+) | | | | ОКС (+) | ОКС (+) | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | | |
| Клеммная коробка | ПК (+) | | | | ПК (+) | | | | | ОКС (+) | ОКС (+) | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | |
| Кабель линии управления | ПК (+) | | | ОЯ (+) | ПК (+) | | | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | | | |
| Силовой кабель | ПЯС (+) | | | ОЯ (+) | ПЯС (+) | | | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | ОЯ (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ОЯ (+) | | | |
| Защитный рукав и крепеж кабеля | ПЯ (+) | | | | | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | ОЯ (+) | | | | | | | | | | | |
| Автоматический выключатель линии управления | | | | | | | | | | | ПЯС (+) | | | ОЯ (+) | | | | | | | ПЯ (+) | | | |
| Автоматический выключатель силовой линии | ПЯС (+) | | | | ПЯС (+) | | | | | | | ПЯС (+) | | | ОЯ (+) | | ПЯ (+) | | | | | | | |
| Тепловое реле | | | | | ПЯС (+) | | | | | | | | | | | ОЯ (+) | | | | | | | | |
| Главный магнитный пускатель | | | | | ПЯС (+) | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | | | ОЯ (+) | | ОКС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | | | | ПЯС (+) | |
| Счетчик электроэнергии | ПКС (+) | | | ОК (+) | ПКС (+) | | | | | | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | ПКС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | ПКС (+) | | ПКС (+) | |
| Амперметр | ПКС (+) | | | ОК (+) | ПКС (+) | | | | | | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | ПКС (+) | | ОКС (+) | ОКС (+) | ПКС (+) | | ПКС (+) | |
| Вольтметр | ПКС (+) | | | ОК (+) | ПКС (+) | | | | | | ПЯС (+) | ПЯС (+) | | | | | ПКС (+) | | | ОКС (+) | ОКС (+) | | ПКС (+) | |
| Магнитный пускатель электродвигателя | | | | | ПЯС (+) | | | | | | ПЯ (+) | ПЯ (+) | | ОЯ (+) | | | | ОКС (+) | ОКС (+) | | ОКС (+) | | ПЯС (+) | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ПЯС (+) | ОЯ (+) |
| Управляющий контакт | | | | | | | | | | | | | | | | | ОЯС (+) | ОКС (+) | ОКС (+) | | ОЯС (+) | ОЯС (+) | ПЯС (+) | |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ПЯ (+) | | ОЯ (+) |

Таблица 2.13 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ электропривода с питанием от воздушной линии

| Элемент системы (сборочная единица) | Воздушная линия (ВЛ) | Опоры | Арматура крепления ВЛ | Вводно-распределительный щит | Электродвигатель переменного тока | Площадка для двигателя | Передача | Кожух передачи | Токосъемник | Клеммная коробка | Кабель линии управления | Силовой кабель | Защитный рукав и крепеж кабеля | Автоматический выключатель линии управления | Автоматический выключатель силовой линии | Тепловое реле | Главный магнитный пускатель | Счетчик электроэнергии | Амперметр | Вольтметр | Магнитный пускатель электродвигателя | Механизм прибора ПСЛ | Управляющий контакт | Кожух механизма прибора ПСЛ |
|---|----------------------|--------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------|----------------|-------------|------------------|-------------------------|----------------|--------------------------------|---|--|---------------|-----------------------------|------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Воздушная линия (ВЛ) | оя (+) | | оя (+) | оя (+) | оя (+) | | | | ок (+) | | ок (+) | ояс (+) | | | | | | окс (+) | окс (+) | окс (+) | | | | |
| Опоры | пя (-) | оя (+) | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Арматура крепления ВЛ | пя (+) | пя (+) | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Вводно-распределительный щит | пя (+) | | | | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | пк (+) | пк (+) | пк (+) | | | | |
| Электродвигатель переменного тока | пя (+) | | | | | оя (+) | ояс (+) | ок (+) | ок (+) | ок (+) | ок (+) | ояс (+) | | | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | окс (+) | окс (+) | окс (+) | ояс (+) | | | |
| Площадка для двигателя | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Передача | | | | | пяс (+) | | | оя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Токосъемник | пк (+) | | | | пк (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | | | | | | | | |
| Клеммная коробка | | | | | пк (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | | | | | | | | |
| Кабель линии управления | пк (+) | | | оя (+) | пк (+) | | | | ояс (+) | ояс (+) | | | оя (+) | ояс (+) | | | оя (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | оя (+) | | |
| Силовой кабель | пяс (+) | | | оя (+) | пяс (+) | | | | ояс (+) | ояс (+) | | | оя (+) | | ояс (+) | | оя (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | оя (+) | | |
| Защитный рукав и крепеж кабеля | | | | | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | | | | | | | |
| Автоматический выключатель линии управления | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | | | пя (+) | | |
| Автоматический выключатель силовой линии | пк (+) | | | | пяс (+) | | | | | | | пяс (+) | | | | | пя (+) | | | | | | | |
| Тепловое реле | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Главный магнитный пускатель | | | | | пяс (+) | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | оя (+) | | | окс (+) | окс (+) | окс (+) | | | пяс (+) | |
| Счетчик электроэнергии | пкс (+) | | | ок (+) | пкс (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | | пкс (+) | |
| Амперметр | пкс (+) | | | ок (+) | пкс (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | | пкс (+) | |
| Вольтметр | пкс (+) | | | ок (+) | пкс (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | пкс (+) | | | | | | | |
| Магнитный пускатель электродвигателя | | | | | пяс (+) | | | | | | пя (+) | пя (+) | | оя (+) | | | | окс (+) | окс (+) | | | | пяс (+) | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ояс (+) | | пяс (+) | оя (+) |
| Управляющий контакт | | | | | | | | | | | | | | | | | ояс (+) | окс (+) | окс (+) | | ояс (+) | ояс (+) | | |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | | |

Таблица 2.14 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ электропривода с питанием от переносного генератора

| Элемент системы (сборочная единица) | Топливо | Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) | Устройство запуска и остановки ДВС | Аккумуляторная батарея | Синхронный генератор | Блок управления генератором | Вольтметр | Амперметр | Частотомер | Вводно-распределительный щит | Электродвигатель переменного тока | Площадка для двигателя | Передача | Кожух передачи | Токосъемник | Клеммная коробка | Кабель линии управления | Силовой кабель | Защитный рукав и крепеж кабеля | Автоматический выключатель линии управления | Автоматический выключатель силовой линии | Тепловое реле | Главный магнитный пускатель | Счетчик электроэнергии | Амперметр | Вольтметр | Магнитный пускатель электродвигателя | Механизм прибора ПСЛ | Управляющий контакт | Кожух механизма прибора ПСЛ |
|---|---------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------|----------------|-------------|------------------|-------------------------|----------------|--------------------------------|---|--|---------------|-----------------------------|------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Топливо | | оя (+) | ок (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) | пя (+) | | пяс (+) | пк (+) | ояс (+) | окс (+) | | | окс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Устройство запуска и остановки ДВС | | пк (+) | ояс (+) | | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Аккумуляторная батарея | | | ок (+) | ояс (+) | | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Синхронный генератор | | | пяс (+) | | | пяс (+) | окс (+) | окс (+) | окс (+) | | пя (+) | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | | | | | | | |
| Блок управления генератором | | | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | | окс (+) | окс (+) | окс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Вольтметр | | | | | пкс (+) | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | | | | | | | | | | пкс (+) | | |
| Амперметр | | | | | пкс (+) | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | |
| Частотомер | | | пкс (+) | | пкс (+) | пкс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Вводно-распределительный щит | | | | | | | | | | | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | пк (+) | пк (+) | пк (+) | | | | |
| Электродвигатель переменного тока | | | | | оя (+) | | окс (+) | окс (+) | | | | оя (+) | ояс (+) | | ок (+) | ок (+) | ок (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | окс (+) | окс (+) | окс (+) | ояс (+) | | |
| Площадка для двигателя | | | | | | | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Передача | | | | | | | | | | | ояс (+) | | ояс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Токосъемник | | | | | | | окс (+) | окс (+) | | | пк (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | | | | | | | | |
| Клеммная коробка | | | | | | | окс (+) | окс (+) | | | пкс (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | | | | | | | | | | | |
| Кабель линии управления | | | | | оя (+) | | окс (+) | окс (+) | | оя (+) | пкс (+) | | | | ояс (+) | ояс (+) | | | оя (+) | оя (+) | | | пя (+) | окс (+) | окс (+) | окс (+) | оя (+) | | | пяс (+) |
| Силовой кабель | | | | | оя (+) | | окс (+) | окс (+) | | оя (+) | ояс (+) | | | | ояс (+) | ояс (+) | | | оя (+) | оя (+) | | оя (+) | пя (+) | окс (+) | окс (+) | окс (+) | оя (+) | | | |
| Защитный рукав и крепеж кабеля | | | | | | | | | | | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | | | | | | | |
| Автоматический выключатель линии управления | | | | | | | | | | | | | | | | | пя (+) | | | | | | пя (+) | | | | | пяс (+) | | |
| Автоматический выключатель силовой линии | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | | | | пя (+) | | | | | пяс (+) | | | | | | | |
| Тепловое реле | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Главный магнитный пускатель | | | | | | | окс (+) | окс (+) | | | пяс (+) | | | | | | оя (+) | ояс (+) | оя (+) | ояс (+) | | | | | окс (+) | окс (+) | окс (+) | | | |
| Счетчик электроэнергии | | | | | | | | | ок (+) | окс (+) | | | | | | | пкс (+) | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | | | пкс (+) |
| Амперметр | | | | | | | | | ок (+) | окс (+) | | | | | | | пкс (+) | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | | | пкс (+) |
| Вольтметр | | | | | | | | | ок (+) | окс (+) | | | | | | | пкс (+) | пкс (+) | | | | | пкс (+) | | | | пкс (+) | | | пкс (+) |
| Магнитный пускатель электродвигателя | | | | | | | окс (+) | окс (+) | | | пяс (+) | | | | | | пя (+) | пя (+) | | ояс (+) | | | | окс (+) | окс (+) | окс (+) | | | пяс (+) | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ояс (+) | ояс (+) |
| Управляющий контакт | | | | | | | | | | | | | | | | | ояс (+) | | | | | | | окс (+) | окс (+) | окс (+) | ояс (+) | пяс (+) | | |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | | |

Таблица 2.15 – Матрица связей «элемент – элемент» СЭ электропривода с питанием от аккумуляторной батареи

| Элемент системы (сборочная единица) | Аккумуляторная батарея | Возобновляемый источник энергии | Контроллер заряда | Вольтметр | Амперметр | Вводно-распределительный щит | Электродвигатель постоянного тока | Площадка для двигателя | Передача | Кожух передачи | Клеммная коробка | Кабель линии управления | Силовой кабель | Плавкий предохранитель линии управления | Плавкий предохранитель силовой линии | Тепловое реле | Переключатель режима работы | Управляющий контакт | Реле управления | Механизм прибора ПСЛ | Кожух механизма прибора ПСЛ |
|---|------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------|----------------|------------------|-------------------------|----------------|---|--------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------------------|
| Аккумуляторная батарея | пяс (+) | пяс (+) | | окс (+) | окс (+) | оя (+) | ояс (+) | | | | ок (+) | оя (+) | оя (+) | окс (+) | окс (+) | пяс (+) | ояс (+) | ояс (+) | | | |
| Возобновляемый источник энергии | ояс (+) | | ояс (+) | окс (+) | окс (+) | ок (+) | ок (+) | | | | | оя (+) | оя (+) | | | | пяс (+) | | | | |
| Контроллер заряда | ояс (+) | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | |
| Вольтметр | пкс (+) | пкс (+) | | | | ок (+) | пкс (+) | | | | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | | | | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | | |
| Амперметр | пкс (+) | пкс (+) | | | | ок (+) | пкс (+) | | | | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | | | | пкс (+) | пкс (+) | пкс (+) | | |
| Вводно-распределительный щит | пя (+) | пк (+) | | пк (+) | пк (+) | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | | | |
| Электродвигатель постоянного тока | пяс (+) | пк (+) | | окс (+) | окс (+) | | | оя (+) | ояс (+) | | | | пя (+) | | ояс (+) | ояс (+) | | | пяс (+) | | |
| Площадка для двигателя | | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Передача | | | | | | пяс (+) | | | | оя (+) | | | | | | | | | | | |
| Кожух передачи | | | | | | | | | пя (+) | | | | | | | | | | | | |
| Клеммная коробка | пк (+) | | | окс (+) | окс (+) | | | | | | | пя (+) | пя (+) | | | | | | | | |
| Кабель линии управления | пя (+) | пя (+) | | окс (+) | окс (+) | оя (+) | | | | | оя (+) | | | ояс (+) | | | | пяс (+) | пяс (+) | | |
| Силовой кабель | пя (+) | пя (+) | | окс (+) | окс (+) | оя (+) | оя (+) | | | | оя (+) | | | | ояс (+) | | пяс (+) | | | | |
| Плавкий предохранитель линии управления | пкс (+) | | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | | | пяс (+) | пяс (+) | | |
| Плавкий предохранитель силовой линии | пкс (+) | | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | | пяс (+) | | | | |
| Тепловое реле | | | | | | | пяс (+) | | | | | | | | | | | | | | |
| Переключатель режима работы | ояс (+) | ояс (+) | ояс (+) | окс (+) | окс (+) | | | | | | | | ояс (+) | | ояс (+) | | | | | | |
| Управляющий контакт | пяс (+) | | | окс (+) | окс (+) | | | | | | | ояс (+) | | ояс (+) | | | | | пкс (+) | | |
| Реле управления | пяс (+) | | | окс (+) | окс (+) | | ояс (+) | | | | | ояс (+) | | ояс (+) | | | | окс (+) | | пяс (+) | |
| Механизм прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ояс (+) | | ояс (+) |
| Кожух механизма прибора ПСЛ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | пяс (+) | |

Коэффициенты актуализации функций k_{aF} , элементов k_{aN} и связей k_{aC} :

$$k_{aF} = \frac{F_{\Pi}}{F_{\text{общ}}}, \quad (2.58)$$

где F_{Π} , $F_{\text{общ}}$ – соответственно количество полезных и общих функций;

$$k_{aN} = \frac{N_{\Pi}}{N_{\text{общ}}}, \quad (2.59)$$

где N_{Π} , $N_{\text{общ}}$ – соответственно количество полезных и общих элементов;

$$k_{aC} = \frac{C_{\Pi}}{C_{\text{общ}}}, \quad (2.60)$$

где C_{Π} , $C_{\text{общ}}$ – соответственно количество полезных и общих связей.

Полезными элементами и связями следует считать те необходимые и достаточные элементы (связи), без которых не будет полноценно выполнена главная функция объекта исследования.

Коэффициенты сосредоточения функций k_{cF} , элементов k_{cN} и связей k_{cC} :

$$k_{cF} = \frac{F_{\text{осн}}}{F_{\text{общ}}}, \quad (2.61)$$

где $F_{\text{осн}}$ – число основных функций;

$$k_{cN} = \frac{N_{\text{осн}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (2.62)$$

где $N_{\text{осн}}$ – число элементов (сборочных единиц), выполняющих или задействованных на выполнении основных функций;

$$k_{cC} = \frac{C_{\text{вн}}}{C_{\text{вн}} + C_{\text{вш}}}, \quad (2.63)$$

где $C_{\text{вн}}$ и $C_{\text{вш}}$ – соответственно число внутренних (элементных) и внешних связей.

Коэффициенты совместимости функций $k_{\text{сов}F}$, элементов $k_{\text{сов}N}$ и связей $k_{\text{сов}C}$:

$$k_{\text{сов}F} = 1 - \frac{F_c}{F_{\text{общ}}}, \quad (2.64)$$

где F_c – число функций согласования;

$$k_{\text{сов}N} = 1 - \frac{N_c}{N_{\text{общ}}}, \quad (2.65)$$

где N_c – число элементов-посредников (сборочных единиц), выполняющих функции согласования;

$$k_{\text{сов}C} = 1 - \frac{C_c}{C_{\text{общ}}}, \quad (2.66)$$

где C_c – число связей для согласования функций.

Коэффициент гибкости k_g системы определяют по количеству потенциально возможных функций:

$$k_g = \frac{F_{\text{осн}} + F_{\text{пот}}}{F_{\text{осн}}}, \quad (2.67)$$

где $F_{\text{пот}}$ – число возможных потенциальных функций.

Тогда эффективность системы можно рассчитать как произведение средних значений коэффициентов актуализации, сосредоточения, совместимости и гибкости:

$$k_{\text{орг}} = \bar{k}_a \bar{k}_c \bar{k}_{\text{сов}} \bar{k}_g. \quad (2.68)$$

Сведем данные по количеству полезных, сосредоточенных, согласованных и гибких функций, элементов и связей в таблицу 2.16.

Таблица 2.16 – Результаты анализа функционально-структурных моделей систем энергоснабжения ДМ

| Система энергоснабжения | Данные функций | | | | | Данные элементов | | | | Данные связей | | | | |
|--|----------------|------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|-------|------------------|
| | F_{Π} | $F_{\text{осн}}$ | F_c | $F_{\text{пот}}$ | $F_{\text{общ}}$ | N_{Π} | $N_{\text{осн}}$ | N_c | $N_{\text{общ}}$ | C_{Π} | $C_{\text{вн}}$ | $C_{\text{вш}}$ | C_c | $C_{\text{общ}}$ |
| Гидравлический привод с гидродвигателем вращательного действия $V_{\text{крГд}}$ | 26 | 6 | 12 | 0 | 26 | 28 | 24 | 10 | 28 | 74 | 11 | 65 | 42 | 76 |
| Гидравлический привод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия $V_{\text{крГц}}$ | 26 | 6 | 12 | 0 | 26 | 29 | 25 | 11 | 29 | 76 | 11 | 67 | 43 | 78 |
| Механический привод $V_{\text{крМ}}$ | 16 | 2 | 6 | 0 | 16 | 22 | 19 | 9 | 22 | 34 | 2 | 34 | 13 | 34 |
| Электрический привод с кабельной линией $V_{\text{крЭкл}}$ | 28 | 6 | 10 | 3 | 28 | 24 | 18 | 12 | 24 | 59 | 17 | 46 | 42 | 63 |
| Электрический привод с воздушной линией $V_{\text{крЭвл}}$ | 28 | 6 | 10 | 3 | 28 | 24 | 19 | 12 | 24 | 57 | 16 | 45 | 42 | 61 |
| Электрический привод с переносным генератором $V_{\text{крЭг}}$ | 32 | 8 | 11 | 3 | 32 | 30 | 20 | 14 | 30 | 83 | 17 | 70 | 55 | 87 |
| Электрический привод с АКБ $V_{\text{крЭакб}}$ | 21 | 5 | 7 | 3 | 21 | 21 | 17 | 11 | 21 | 67 | 31 | 39 | 37 | 70 |

На основе данных таблицы 2.16 рассчитаем средние составляющие коэффициента эффективности рассмотренных вариантов (таблица 2.17).

Таблица 2.17 – Коэффициенты эффективности рассматриваемых вариантов привода опорных тележек ДМ

| Система энергоснабжения | Коэффициент | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|----------|----------|-------------|----------------|----------|----------|-------------|---------------|------------|------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | актуализации | | | | сосредоточения | | | | совместимости | | | | гибкости | эффективности |
| | k_{aF} | k_{aN} | k_{aC} | \bar{k}_a | k_{cF} | k_{cN} | k_{cC} | \bar{k}_c | k_{covF} | k_{covN} | k_{covC} | \bar{k}_{cov} | \bar{k}_r | \bar{k}_{opt} |
| Гидравлический привод с гидродвигателем вращательного действия $V_{крГд}$ | 1,0 | 1,0 | 0,97 | 0,99 | 0,23 | 0,85 | 0,14 | 0,41 | 0,53 | 0,64 | 0,45 | 0,54 | 1,0 | 0,22 |
| Гидравлический привод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия $V_{крГц}$ | 1,0 | 1,0 | 0,97 | 0,99 | 0,23 | 0,86 | 0,14 | 0,41 | 0,53 | 0,62 | 0,45 | 0,53 | 1,0 | 0,22 |
| Механический привод $V_{крМ}$ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,13 | 0,86 | 0,06 | 0,35 | 0,63 | 0,59 | 0,62 | 0,61 | 1,0 | 0,21 |
| Электрический привод с кабельной линией $V_{крЭкл}$ | 1,0 | 1,0 | 0,93 | 0,97 | 0,21 | 0,75 | 0,27 | 0,41 | 0,64 | 0,50 | 0,33 | 0,49 | 1,5 | 0,29 |
| Электрический привод с воздушной линией $V_{крЭвл}$ | 1,0 | 1,0 | 0,93 | 0,97 | 0,21 | 0,79 | 0,26 | 0,42 | 0,64 | 0,50 | 0,31 | 0,48 | 1,5 | 0,29 |
| Электрический привод с переносным генератором $V_{крЭг}$ | 1,0 | 1,0 | 0,95 | 0,98 | 0,25 | 0,66 | 0,19 | 0,37 | 0,66 | 0,53 | 0,37 | 0,52 | 1,38 | 0,26 |
| Электрический привод с АКБ $V_{крЭакб}$ | 1,0 | 1,0 | 0,95 | 0,98 | 0,23 | 0,80 | 0,44 | 0,49 | 0,67 | 0,47 | 0,47 | 0,54 | 1,2 | 0,31 |

Полученные результаты функционально-структурного синтеза представленных систем в целом соответствуют действительности. Оценка актуализации, близкая к единице, свидетельствует о том, что все рассматриваемые функции и сборочные единицы представлены в достаточном количестве для выполнения главной цели – передачи энергии движителям опорных тележек ДМ. Актуализация связей в системах электрического привода отличается меньшим значением (0,93...0,95) от данных гидропривода и механического привода (0,98...1,0) за счет не связанных некоторых элементов функций F_2 и F_3 по обеспечению безопасной эксплуатации и удобства обслуживания. Например, защиту электрооборудования от токов короткого замыкания выполняет автоматический выключатель (АВ), который не защищает персонал от поражения электрическим током при случайном

прикосновении к частям машины. Для этого все металлические части заземляют. Поэтому в матрице «элемент – элемент» АВ и заземление не связаны.

Оценка сосредоточения функций систем находится на уровне 0,13...0,25, что свидетельствует о наличии большого числа вспомогательных функций относительно основных. Это связано с преобразованием первичной энергии и обеспечением безопасности ее транспортирования. Для механического привода на функцию передачи энергии требуется от 6 до 9 функциональных элементов (см. таблицу 2.17), коэффициент сосредоточения функций – 0,13. Электрический привод с переносным генератором имеет в 4 раза больше основных функций, но в среднем на одну функцию приходится от 2 до 7 функциональных элементов, коэффициент сосредоточения – 0,25. Однако число сборочных единиц, участвующих в выполнении основных функций, относительно общего числа элементов у механического привода больше на 20 % (k_{cN}).

Сосредоточенность системы оценивается также наличием внешних и внутренних связей и их согласованностью. Если элемент, выполняя определенную функцию, внешне связан с другим элементом и не имеет внутренних связей с другими элементами, то его выход из строя приводит к отказу всей системы. Чем больше число внутренних связей, тем выше уровень согласованности системы. Наибольший коэффициент согласованности связей у системы с электрическим приводом на аккумуляторных батареях. Это объясняется упрощенной схемой питания, управления и согласованностью элементов.

Совместимость систем с выполнением главной цели оценивают также по функциям, элементам и связям. Чем больше функционально-структурных позиций, тем выше совместимость системы. Существенные различия наблюдаются по совместимости связей у электропривода с питанием от воздушной линии (0,31) и механического привода (0,62).

Гибкость системы как показатель ее эффективности отражает количество дополнительно возможных функций, которые на любой стадии эксплуатации можно внедрить в систему без капитальных изменений конструкции. Как видно, для гидравлического и механического приводов внедрить дополнительные функции невозможно без усложнения и существенных изменений конструкций. Для

электропривода в систему питания от электрической энергии можно добавить несколько дополнительных функций, которые улучшат работу системы:

- 1) дистанционное включение/отключение системы энергоснабжения ДМ;
- 2) контроль параметров процесса измерением электрических параметров неэлектрических величин;
- 3) дистанционное управление параметрами процесса.

Таким образом, эффективность различных вариантов систем энергоснабжения отражает функционально-структурные свойства. Гидравлический привод, имея высокую степень актуализации, где все элементы задействованы на достижение цели, все-таки не достаточно налажен на внутренние связи элементов. Поэтому при отказе одного элемента под угрозу выхода из строя попадают целый ряд элементов и вся система в целом. Аналогичное положение и у механического привода.

В отличие от электрического и гидравлического приводов, механический имеет меньшее число структурных единиц, что свидетельствует о простоте системы. Электрический привод по единичным показателям не лучше, а по некоторым показателям даже хуже гидравлического и механического. Однако существенным преимуществом системы с электроприводом является ее гибкость, что позволяет ее улучшить с точки зрения всего процесса полива.

На основе функционально-структурного синтеза однозначное решение при выборе системы энергоснабжения дождевальнй машины в пользу какого-либо привода принять нельзя, так как каждая система оценивается индивидуальным уровнем преобразования энергии, стоимости, эксплуатационной надежности и т. п. Функционально-структурную эффективность как один из важных показателей необходимо учитывать при выборе системы в выражении показателя эффективности:

$$V_{\text{крЭо}} = \frac{V_{\text{кр}}}{k_{\text{орг}}}. \quad (2.69)$$

Определение условия наименьшего энергопотребления.

Полив дождевальными машинами земель сельскохозяйственного назначения связан с выполнением трех стадий. Каждая стадия имеет энергетическую, трудовую, материальную нагрузку. Энергопотребление определяется видом на-

грузки. Первая нагрузка N_1 определяется водоподачей, которую, как правило, выполняет электрический двигатель насоса, нагнетая жидкость в трубопроводе для доставки ее на поливной участок; вторая нагрузка N_2 – водораспределением, где с помощью гидравлического, электрического или механического привода энергия преобразуется и передается движителям опорных тележек для распределения поливной воды; третья нагрузка N_3 – затратами энергии на дождевание, то есть разделение потока струйной жидкости на капли дождя. Каждый вид нагрузки сопровождается потерями энергии.

Энергопотребление для нагрузки N_3 определить сложно, поскольку рабочий процесс дождевальной машины выполняется при условии создания давления, которое обеспечивает этот вид нагрузки на входе в трубопровод. Давление создается водонапорным насосом, который, как правило, расположен около водоема. Расстояние от водоема до неподвижной опоры ДМ может быть различным. Для электрифицированных машин с энергетической точки зрения водоподача не относится к дождевальной машине. Однако при создании низкого давления на входе в ДМ необходимо установить дополнительный насос на входе ДМ, иначе при низком давлении (до $1,5 \text{ кг/см}^2$, или $0,15 \text{ МПа}$) не будут образовываться капли с требуемой кинетической энергией [5, 18, 183, 219, 261, 296, 303]. В этом случае потребление энергии дополнительным насосом относится к ДМ.

Можно записать несколько случаев выполнения нагрузки:

1) водозаборный насос обеспечивает водоподачу и дождевание:

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 \rightarrow N_1 + N_3 \\ Z_2 \rightarrow N_2 \end{array} \right\} \quad (2.70)$$

где Z_1 – энергопотребление электродвигателем насоса водоподачи; Z_2 – энергопотребление системы энергоснабжения ДМ;

2) водозаборный насос обеспечивает только водоподачу, а система энергоснабжения ДМ – остальную нагрузку:

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 \rightarrow N_1 \\ Z_2 \rightarrow N_2 + N_3 \end{array} \right\}; \quad (2.71)$$

3) водозаборный насос обеспечивает всю нагрузку:

$$Z_1 \rightarrow N_1 + N_2 + N_3. \quad (2.72)$$

В третьем случае энергия потока жидкости после выполнения нагрузки N_1 достаточна для выполнения нагрузок N_2 и N_3 , как, например, это происходит в машинах с гидравлическим приводом. Тогда выделить и учесть затраты на перемещение опорных тележек можно косвенно, так как в каждый момент времени будет изменяться пропорциональность нагрузок N_1 и N_2 из-за изменения входного давления жидкости и механических нагрузок движителей опорных тележек.

Важно оценить возможный минимум энергопотребления на водораспределение. Рассмотрим эту проблему как частный случай потребления энергии дождевальной машиной. Выделяют подводящий и распределительный элементы. В первом из них вода подается из водоема по трубопроводу к центру размещения машины, во втором – распределительный трубопровод с помощью тележек подает воду на поле к растениям.

Основная функция ДМ – доставить требуемое количество воды на каждый участок площадью S_i ее захвата (рисунок 2.20) [27, 62]. В этом случае затраты энергии распределяются между составляющими затрат на нагнетание воды в трубопроводе ДМ (Z_1) и затрат энергии на перемещение этого трубопровода с помощью энергооборудования опорных тележек (Z_2). Данный комбинированный вид энергозатрат объясняется традиционным видом построения дождевальных машин. Анализируя составляющие этих энергозатрат, нетрудно понять, что затраты на доставку воды с помощью тележек будут всегда больше затрат доставки по трубопроводу. Данное положение вызывает интерес поиска наименьшего энергопотребления с помощью тележек.

Для того, чтобы определить минимальное потребление энергии на распределение поливной воды

$$Z_2 \rightarrow \min, \quad (2.73)$$

необходимо создать условие нагрузки:

$$N_2 \rightarrow \min. \quad (2.74)$$

Данное условие позволит определить минимальное энергопотребление на распределение воды, т. е. энергопотребление системы энергоснабжения ДМ.

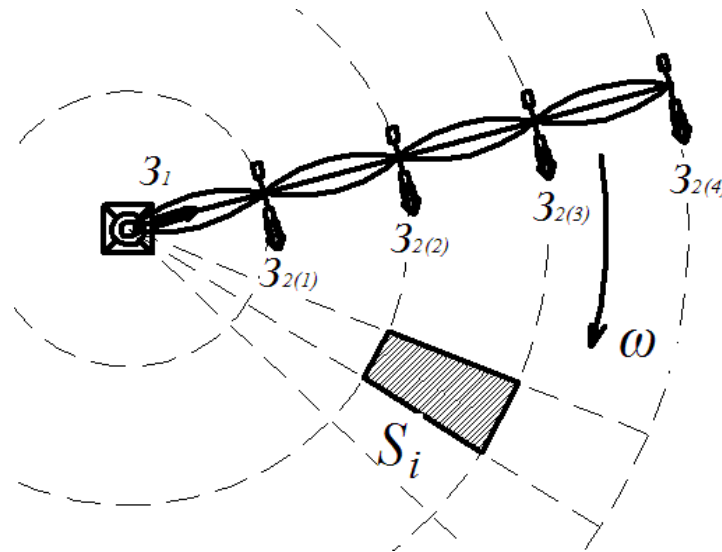


Рисунок 2.20 – Фрагмент рабочего процесса и структура затрат энергии ДМ

Потребление энергии будет минимальным, если нагрузка распределения воды будет стремиться к нулю. Данное условие схоже с условиями по системе капельного стационарного полива, т. е. нагрузка распределения воды будет приравнена к нагрузке на ее доставку. Результаты энергопотребления различных вариантов передачи поливной воды приведены в приложении *Б*.

2.6 Выводы по главе

1. Разработана методология исследования эксплуатации дождевальных машин кругового действия в технологиях искусственного орошения на основе выделения объекта исследования, классификации учитываемых факторов и обоснования эффективности энергоснабжения, позволяющая получить энергоэффективную дождевальную машину кругового действия, эксплуатируемую на площади действия до 358,2 га с поливной нормой до 600 м³/га, продолжительностью единовременного полива до 225 ч, продолжительностью сезонного использования до 6 мес., максимальным сроком службы 25 лет.

2. На основе функционально-структурного анализа синтезированы варианты систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия на базе гидравлического, механического и электрического приводов и установлены значения коэффициентов эффективности: для гидравлического привода $k_{оргГ} = 0,22$; механического – $k_{оргМ} = 0,21$; электрического – $k_{оргЭ} = 0,26 \dots 0,31$.

3. Установлено, что эффективность системы энергоснабжения при эксплуатации достигается при условиях:

- на всем сроке службы при меньших стоимости элементов системы и годовых эксплуатационных затратах;
- интегрально при меньшей стоимости элементов системы (при больших годовых эксплуатационных затратах) на всем сроке службы;
- интегрально при меньших годовых эксплуатационных затратах (при большей стоимости элементов системы) на всем сроке службы.

4. На основе методологии получены основные укрупненные показатели, влияющие на энергопотребление и эксплуатационные затраты: поливная норма, площадь поливного участка, входное давление на гидранте ДМ, мощность оборудования, его коэффициент полезного действия, надежность, масса составных элементов и оборудования системы, а также эксплуатационные затраты, взаимосвязь которых необходимо теоретически обосновать.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

3.1 Обоснование параметров для оптимизации системы энергоснабжения

Целью данной главы является создание общих теоретических системных положений для выбора энергоснабжения по исходным технико-экономическим данным дождевальных машин кругового действия и условий ее эксплуатации на поливном участке.

Требования к дождевальной машине выдвигают на основе общих исходных данных и данных состояния оросительной сети, как показано в 1-й и во 2-й главах. Особенности водоподачи характеризуют возможности полива и оказывают существенное влияние на выбор системы энергоснабжения ДМ. Параметрами водоподачи могут быть, например, давление в трубопроводе, протяженность оросительной сети, которые создают условия для работы системы энергоснабжения ДМ. Поэтому важно выявить взаимосвязь условий эксплуатации с параметрами системы энергоснабжения и определить из множества вариантов энергоснабжения ДМ оптимальный для конкретных условий эксплуатации.

Представим, что система энергоснабжения характеризуется показателями качества, основным из них принят показатель эффективности, определенный по выражению (2.17). Данный показатель условно отражает предпочтение системы и более полно характеризует ее с точки зрения энергопотребления в совокупности с действием обособленных технико-экономических показателей, таких, как стоимость C , КПД η , вероятность отказа $Q_o(t)$, эксплуатационные затраты z и т. п. Исходя из данного суждения, $V_{кр}$ можно рассматривать как конечный показатель оценки выбранной системы энергоснабжения ДМ. В отдельных случаях можно принять любой показатель. При сравнении двух параметров системы (например, КПД и стоимость системы) показатель $V_{кр}$ можно принять в виде ограничения. Это для случаев, когда показатели эффективности разных систем равны.

Различные математические представления решений данной проблемы могут быть изложены по безусловному критерию предпочтения. Тогда результаты и выводы будут представлены в иной форме. Безусловный критерий предпочтения охватывает все рассматриваемые параметры системы, однако привести решение к единому целому становится сложно. Если все-таки удастся получить решение, то оно не дает конечных результатов выбора того или иного варианта энергоснабжения.

Решения с применением любого условного показателя предпочтения можно получить с обоснованием целого ряда допущений, часто незначительных, но в нашем случае целесообразно найти границы по условному показателю (критерию) предпочтения, чем выполнять громоздкое решение безусловного критерия предпочтения. Знание этих границ облегчает получение результатов и делает решение более наглядным и обоснованным.

Показатель эффективности как результирующий показатель качества и как один из показателей системы энергоснабжения зависит от других показателей. Во 2-й главе описаны факторы, влияющие на эффективность системы. Все показатели учесть сложно, поскольку одни из них влияют незначительно (например, запыленность), другие – с задержкой проявления, что искажает действие других показателей (например, затраты на ресурс источника, т. е. первичный вид энергии [314, 97, 142, 82, 204, 224, 244, 267, 270, 296, 297]). Некоторые показатели качества в большей степени формируют показатель эффективности рассматриваемых вариантов систем, который можно записать как функцию вида:

$$V_{\text{кр}} = f(P; \eta; C; P_0(t); z; m_{\text{СЭ}}), \quad (3.1)$$

где P – установленная мощность СЭ, кВт; η – КПД СЭ, %; C – стоимость СЭ, руб.; $P_0(t)$ – вероятность безотказной работы (показатель надежности); z – эксплуатационные затраты, руб.; $m_{\text{СЭ}}$ – масса элементов СЭ, кг.

Представленная совокупность показателей более полно формирует значения $V_{\text{кр}}$, которые в графическом виде образуют область множества решений различных вариантов СЭ. При этом на графике данный показатель будет отличаться не только по значению, но и по направлению в сторону того или иного показателя качества. Справедливо теоретически решать проблему в векторном виде. На основе выражения (2.39) эффективность прямо пропорционально зависит от коли-

чества потребленной энергии. Построим дальнейшее исследование с помощью векторного синтеза показателя эффективности системы $V'_{кр}$ (руб. · кВт · ч).

Для конкретных условий эксплуатации ДМ значения показателя эффективности будут расположены в некотором пространстве значений технико-экономических показателей рассматриваемых систем (рисунок 3.1). Из возможных вариантов можно определить оптимальный с точки зрения наименьшего энергопотребления. Векторы показателей эффективности $V'_{кр}$ будут отличаться друг от друга и указывать на приоритет какого-либо качества.

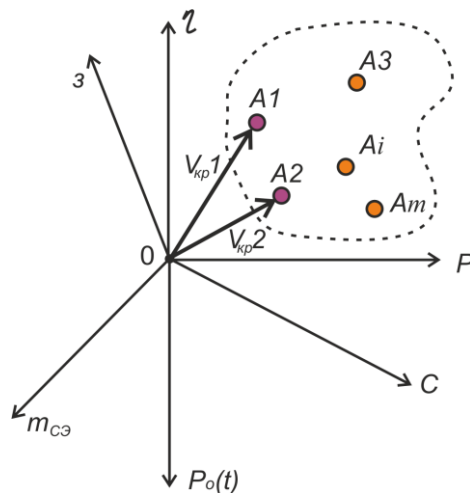


Рисунок 3.1 – Векторы показателя эффективности СЭ
($A1, A2, A3, Ai, Am$ – область множества вариантов систем
энергоснабжения дождевальная машины)

Для удобства сравнения значений результирующего показателя качества, соответствующих вариантам систем энергоснабжения ДМ, нужно привести все показатели качества к единой системе отсчета [70, 101, 102, 108, 125, 132, 157, 182, 192, 204, 244, 335]. По условию, они должны быть больше или равны нулю, и чем меньше их значения (за исключением КПД), тем меньше значение результирующего показателя и, соответственно, тем лучше система:

$$V'_{кр} \rightarrow \min. \quad (3.2)$$

Оценим показатели качества из выражения (3.1) и приведем их к единой системе отсчета. Это упрощает получение результатов и не приводит к искажению. В данном случае при построении решений все показатели ведут отсчет от нуля, иначе построить и сравнить результирующие показатели каждого варианта системы энергоснабжения невозможно.

Показатель мощности P соответствует стандартному виду, т. е. чем меньше мощность, потребляемая системой, тем лучше система. Данный показатель будем рассматривать в именованных единицах измерения (кВт). Любой i -й вариант комплекта энергооборудования дождевальная машины будет потреблять мощность, соответствующую условию:

$$P_i > 0, (i = \overline{1, n}), \quad (3.3)$$

где n – количество вариантов систем энергоснабжения.

Лучшая система будет при

$$P_i \rightarrow P_{\min}. \quad (3.4)$$

Показатель мощности следует рассматривать на единицу площади, т. е. как удельный:

$$P' = \frac{P_i}{S}. \quad (3.5)$$

Коэффициент полезного действия – это показатель, который измеряется в процентах (%) или долях. Система тем лучше, чем больше КПД. Тогда приведем показатель КПД к стандартному виду через показатель потерь энергии η' :

$$\eta'_i = 100\% - \eta_i. \quad (3.6)$$

Тогда при росте КПД показатель потерь η' будет уменьшаться и, соответственно, результирующий показатель станет меньше. Примем к рассмотрению КПД системы через показатель потерь:

$$\eta' \rightarrow \min. \quad (3.7)$$

Показатели стоимости C (руб.) и массы $m_{сэ}$ (кг) энергооборудования примем в стандартном виде, поскольку их наименьшие значения определяют наилучшую систему. В идеальном случае лучшей системой является та, у которой все показатели качества имеют наименьшие значения. Очевидно, что ни один вариант не может обладать нулевыми показателями. Лучшей системой, при прочих равных условиях, будет та, где

$$C_i \rightarrow \min; \quad (3.8)$$

$$m_{сэi} \rightarrow \min. \quad (3.9)$$

Надежность системы лучше оценивать комплексным показателем, например, коэффициентом готовности, который учитывает продолжительность нара-

ботки до отказа, продолжительность восстановления (для ремонтируемого оборудования). Однако, если ориентироваться на современный рынок изготовления оборудования, то в большинстве случаев оборудование становится неремонтируемым в связи с использованием современных технологий изготовления деталей, узлов, агрегатов. Тогда в пределах одной машины ремонт узла или другого элемента системы энергоснабжения становится экономически нецелесообразным. В этих случаях отказавший элемент проще заменить на новый. На основе этого примем допущение, что оборудование системы энергоснабжения в пределах одной машины является неремонтируемым. Тогда надежность будем оценивать вероятностью отказа $Q_o(t)$, а не коэффициентом готовности K_T , как это было указано во 2-й главе. При наименьшей вероятности отказа $Q_o(t)$ (%) показатель эффективности системы также будет стремиться к минимальному значению:

$$Q_{oi}(t) \rightarrow \min. \quad (3.10)$$

Эксплуатационные затраты z (руб.) включают в себя затраты на техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт, наладку и испытание, оснащение ремонтно-обслуживающей базы, приобретение ресурсов и энергии, покрытие ущерба из-за отказов элементов системы. Данный показатель также соответствует стандартному виду:

$$z_i \rightarrow \min. \quad (3.11)$$

Для определения значений этих показателей, а также их взаимосвязи друг с другом необходимо обозначить условия и ограничения самого процесса полива дождевальными машинами. На формирование показателей качества системы энергоснабжения влияет множество условий. Назовем их условиями эксплуатации, из которых можно выделить основные:

1. Площадь поливного участка – захват дождевальной машины, который определяет ее длину, количество секций и дождеобразующих устройств.

2. Поливная норма – параметр, который определяет требуемое количество воды на удельную площадь участка (например, 1 га) за один полив. На это влияют гидромодуль ДМ, диаметр трубопровода, скорость перемещения, параметры дождеобразующих устройств, энергопотребление ДМ на полив и т. п. (при эксплуата-

ции ДМ в течение сезона в некоторых случаях можно рассматривать оросительную норму).

3. Прирост урожая и прибыли от полива культуры дождевальными машинами. Прирост урожая оценивает естественный эффект, полученный в результате полива растений, а прирост прибыли – экономическую целесообразность применения дождевальной машины и определяется чистым дисконтированным доходом или индексом доходности.

4. Давление на гидранте (на входе в дождевальную машину) и диаметр водоподводящего трубопровода. По этим показателям определяют возможность обеспечения требуемой нормы полива и характеристику водоподдачи.

5. Удаленность центральной неподвижной опоры ДМ от централизованного источника электрической энергии (трансформаторной подстанции – ТП) или от склада горюче-смазочных материалов (ГСМ). Склад ГСМ и ТП чаще расположены в населенных пунктах. Примем удаленность от централизованного источника энергии.

Сведем показатели качества системы энергоснабжения дождевальной машины и условия эксплуатации в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Основные показатели исследования

| Условия эксплуатации | | | | Параметры системы энергоснабжения | | | |
|--|--------------------|-----------------|----------------------|---|--------------|------------------|----------------------|
| параметр | ед. измер. | обозначение | условное обозначение | параметр | ед. измер. | обозначение | условное обозначение |
| Поливная норма | м ³ /га | $m_{\text{пн}}$ | z_1 | Показатель эффективности СЭ | руб. · кВт·ч | $V'_{\text{кр}}$ | k_1 |
| Площадь поливного участка | га | S | z_2 | Удельная мощность СЭ | кВт/га | P' | k_2 |
| Стоимость ДМ без энергооборудования СЭ | руб. | K | z_3 | Показатель потерь энергии | % | η' | k_3 |
| Давление поливной воды на входе в ДМ | МПа | p | z_4 | Стоимость СЭ | руб. | C | k_4 |
| Удаленность от централизованного источника энергии | м | $l_{\text{нп}}$ | z_5 | Показатель надежности СЭ (вероятность отказа) | % | $Q_0(t)$ | k_5 |
| Удаленность от водоема | м | $l_{\text{в}}$ | z_6 | Эксплуатационные затраты | руб. | z | k_6 |
| Прирост прибыли от полива дождеванием | руб. | $\Delta\Pi$ | z_7 | Масса энергооборудования СЭ | кг | $m_{\text{СЭ}}$ | k_7 |

Варианты систем энергоснабжения образуют данные, которые необходимо представить в пространстве действия факторов, где формируется конечное множество допустимых точек. Задача состоит в выборе оптимального варианта, который по сравнению с другими обладает наименьшим значением результирующего показателя $V'_{кр}$.

При оптимизации параметров системы энергоснабжения значение результирующего вектора изменяется в зависимости от условий эксплуатации. Тогда каждый из показателей k_1, \dots, k_7 может зависеть от параметров z_1, \dots, z_7 . Эти зависимости называют целевыми функциями [166, 182, 284, 307]. Определим для каждого показателя СЭ функции связи и ограничений.

Векторный синтез системы так или иначе сводится к определению общей целевой функции. Рассмотрим целевую функцию определения удельной мощности СЭ и связи с параметрами процесса:

$$P' = f(m_{пн}; S), \quad (3.12)$$

или

$$k_2 = f(z_1; z_2) \rightarrow \min.$$

Значение мощности зависит от максимальной длины трубопровода и, соответственно, от площади полива, а также от массы поливной воды.

Показатель z_1 формирует требования к конструктивным особенностям ДМ (диаметру трубопровода, конструкций опор и т. п.). Сначала на основе рекомендаций [231, 262] определяют орошаемую площадь, т. е. показатель z_2 , который формирует количество секций ДМ. В результате для захвата площади S длина водораспределительного трубопровода более точно определяет значение z_2 .

Очевидно, что:

$$z_1 > 0;$$

$$z_2 > 0.$$

Тогда суммарная мощность СЭ:

$$\Sigma P = P''m_{пн} + P'S, \quad (3.13)$$

где P'' и P' – коэффициенты, зависящие от типа СЭ, $(Вт \cdot га)/м^3$ и $Вт/га$.

Полученное выражение (3.13) является функцией связи суммарной мощности от условий эксплуатации. Регулирование поливной нормы на практике выполняют путем регулирования скорости движения ДМ. Для всех возможных систем можно принять удельную мощность поливной нормы как постоянную величину:

$$P''m_{\text{пн-макс}} = \text{const} = b, \quad (3.14)$$

b – постоянная величина мощности, определяемая максимальной поливной нормой ДМ z_1 , Вт.

Следовательно, оптимальное значение k_2 :

$$\left. \begin{aligned} k_2 &= \frac{B}{z_2}, \\ B &= \sum P - b \rightarrow \min, \\ z_2 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Минимальное значение показателя k_{2i} зависит от B_i системы энергоснабжения какого-либо варианта и стремится к минимуму:

$$B_i \rightarrow \min.$$

Проведем анализ и рассмотрим целевую функцию связи показателя потерь энергии (показатель КПД) с условиями эксплуатации:

$$\eta' = f(p; l_{\text{нп}}), \quad (3.16)$$

или в условных обозначениях:

$$k_3 = f(z_4; z_5).$$

КПД различных систем рассматривают относительно затрат мощности. В гидравлических и электрических системах это можно определить через потери энергии. В механических системах источником энергии является горючее топливо (т. е. происходит преобразование внутренней энергии топлива в механическую), поэтому структуру потерь для них рассмотреть сложно.

В гидравлических системах изменение показателя КПД несколько отличается от КПД в электрических системах, как было рассмотрено в п. 2.3. Проведем анализ данной зависимости и рассмотрим целевую функцию связи.

Показатель потерь энергии можно выразить через КПД:

$$\left. \begin{aligned} \eta' &= 100 \% - \eta_i \\ \eta' &= 1 - \eta_i \end{aligned} \right\},$$

тогда

$$\eta' = \frac{\Delta P}{\sum P}, \quad (3.17)$$

где ΔP – потери мощности на всех этапах, Вт; $\sum P$ – полная мощность, отпущенная источником энергии, Вт.

Распишем потери мощности с учетом удаленностей соответственно от централизованного источника энергии $l_{\text{нп}}$ и водоема $l_{\text{в}}$.

Для электрической системы потери мощности можно определить по формуле:

$$\Delta P_{\text{э}} = \alpha \sqrt{\frac{S}{\pi}} + \beta l_{\text{нп}}, \quad (3.18)$$

где α – удельные потери электроэнергии на длину трубопровода ДМ с учетом потерь в электроприводах, Вт/м; β – удельные потери электроэнергии в линии от ТП до неподвижной центральной опоры ДМ, Вт/м.

Для других электрических систем (например, с питанием от дизельного или бензинового переносного генератора) удаленность от централизованного источника энергии в этом расчете не учитывают, так как генераторы, как правило, устанавливают рядом с неподвижной опорой. В случаях с аккумуляторным питанием при определении показателя КПД в качестве потерь принимают только потери в электроприемниках, поскольку аккумуляторы располагают рядом с электроприводом, и потери на передачу электроэнергии сводятся к нулю.

Для гидравлической системы потери мощности:

$$\Delta P_{\text{г}} = u_{\text{п}} \sqrt{\frac{S}{\pi}} + y_{\text{п}} l_{\text{в}}, \quad (3.19)$$

где u_n – удельные потери энергии движения жидкости (поливной воды) на длину трубопровода ДМ с учетом потерь в каждом дождеобразующем устройстве, Вт/м;
 y_n – удельные потери энергии движения жидкости в магистральном трубопроводе от водоема до неподвижной опоры ДМ, Вт/м.

$$\left. \begin{aligned} k_{3\Gamma} &= \frac{u_n \sqrt{\frac{z_2}{\pi}} + y_n z_6}{xz_4} \rightarrow \min, \\ k_{3Э} &= \frac{\alpha \sqrt{\frac{z_2}{\pi}} + \beta z_5}{b + k_2 z_2} \rightarrow \min, \\ z_5 &\rightarrow \min, \\ z_6 &\rightarrow \min, \\ z_4 &\rightarrow \max. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

где x – постоянная величина, определяющая величину затрат мощности на единицу давления для гидравлической системы, Вт/МПа.

Значение входного давления z_4 в (3.20) должно быть максимально возможным. Оно определяется состоянием насосной станции. Очевидно, что при поливе ориентируются на общее снижение энергопотребления, в том числе на водоподачу, что ограничивает показатель давления. В соответствии с агротехническими требованиями полива давление на входе в водораспределительный трубопровод ДМ следует поддерживать в допустимом диапазоне значений (в зависимости от типа привода: для гидропривода – 0,4...0,65 МПа, для электропривода – 0,25...0,4 МПа). Фактическое давление зависит от многих факторов: удаленности поливного участка от водоема, разбора поливной воды в оросительной сети, напора насоса и т. п. Согласно [187], напор и, соответственно, давление прямо пропорциональны потребляемой мощности насоса. В наихудших условиях эксплуатации ДМ выполнение агротехнических требований по давлению требует использования насоса соответствующей мощности. Поэтому при решении нашей проблемы давление на входе должно быть максимально возможным.

Изменение показателя потерь энергии для гидравлической и электрической систем показано на рисунке 3.2.

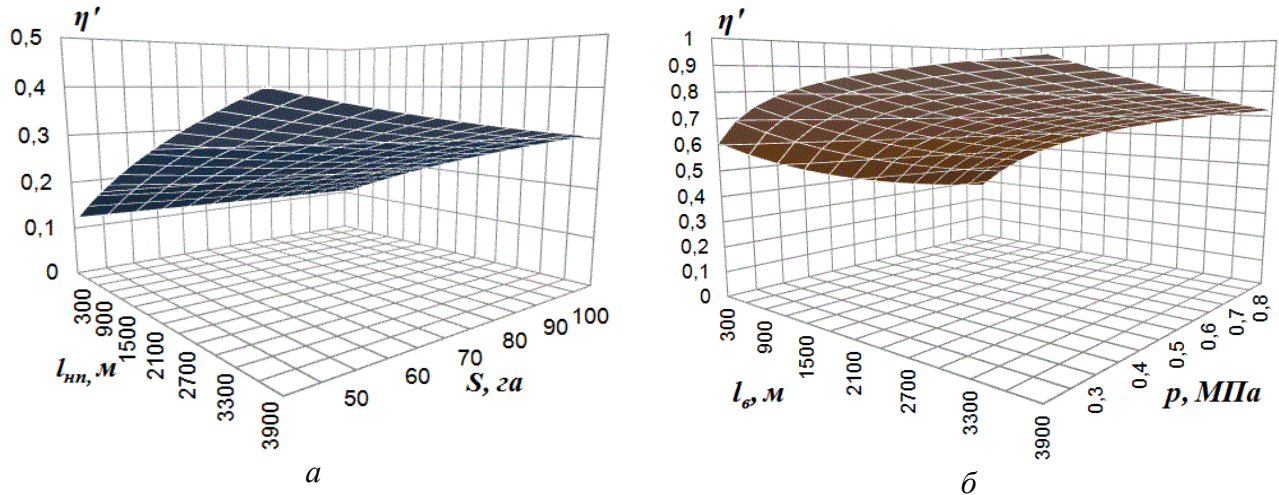


Рисунок 3.2 – Графическое представление зависимости показателя КПД от условий эксплуатации: *a* – электрический привод; *б* – гидравлический привод

Показателем надежности СЭ примем вероятность отказа, которая определяется заложенной конструктивной надежностью, эксплуатационной надежностью и воздействием условий окружающей среды:

$$Q_o(t) = f(K; C; z). \quad (3.21)$$

Анализируя известные выражения [118, 170, 193], вероятность отказа можно представить как функцию через интенсивность отказа λ :

$$Q_o(t) = 1 - \frac{1}{e^{\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}}, \quad (3.22)$$

где t – период эксплуатации оборудования, ч; τ – рассматриваемый период работы оборудования, ч.

В выражении (3.22) вероятность отказа будет минимальной при

$$\lambda(\tau) \rightarrow \min. \quad (3.23)$$

Оценим вероятность отказов по интенсивности отказов для двух случаев: для базовой интенсивности отказов $\lambda_B(t)$, которая определяется конструктивной надежностью ДМ с СЭ, и для текущей интенсивности отказов $\lambda_T(\tau)$, которая определяется после некоторого периода эксплуатации в производственных условиях.

Базовое значение интенсивности отказов СЭ связано функцией согласно [229] и представляет предельное значение:

$$\lambda_B(t) = \frac{Z_T^2(t)}{Z_B Y_0}, \quad (3.24)$$

где $Z_T(t)$ – текущие эксплуатационные затраты на ДМ, приведенные к рассматриваемому периоду t , руб.; Z_B – базовые затраты на ДМ, руб.; Y_0 – ущерб из-за отказа СЭ, руб.

$$Y_0 = y_t t_{B0},$$

где y_t – удельный ущерб из-за отказов оборудования, руб./ч; t_{B0} – продолжительность восстановления, ч.

Текущие годовые затраты на дождевальную машину:

$$Z_T(t) = z, \quad (3.25)$$

где z – годовые эксплуатационные затраты на СЭ, руб.

Базовые затраты:

$$Z_B = K + C. \quad (3.26)$$

Из анализа выражения (3.24) видно, что интенсивность отказов стремится к минимуму, если знаменатель стремится к максимуму, т. е.:

$$Z_B Y_0 \rightarrow \max.$$

Следовательно, для обеспечения высокого уровня базовой надежности необходимо оснастить систему энергоснабжения и дождевальную машину в целом дополнительными техническими средствами, повышающими надежность работы. Например, использовать герметичные соединительные муфты для кабеля или установить прокладки и ограждения, защищающие от вибрации и ударов. Это, соответственно, приведет к увеличению стоимости всей дождевальной машины, включая систему энергоснабжения, K и C (см. таблицу 3.1).

Текущее значение интенсивности отказов определяется также по зависимости (3.24), но рассматриваются другие составляющие затрат:

$$\lambda_T(\tau) = \frac{Z_T'^2(\tau)}{Z_T(t) Y_0(t_B)}, \quad (3.27)$$

где $Z_T'(\tau)$ – текущие эксплуатационные затраты на момент эксплуатации в период τ , руб.

Если представить текущие эксплуатационные затраты:

$$Z'_T(\tau) = aZ_T(t),$$

где a – постоянная безразмерная величина, то

$$\lambda_T(\tau) = \frac{a^2 Z_T(t)}{Y_o(t_B)}. \quad (3.28)$$

Согласно теории эксплуатации [118, 274], ущерб обратно пропорционален эксплуатационным затратам. Своевременное и качественное выполнение мероприятий по техническому обслуживанию и текущему ремонту оборудования снижает риск появления ущерба.

Подставляя полученные выражения (3.26) и (3.28) в (3.22), получим зависимость показателя надежности системы энергоснабжения с условиями эксплуатации:

$$\left. \begin{aligned} k_5 &= 1 - e^{-\int_0^t \frac{k_6^2}{(z_3+k_4)\delta_y} dt}, \\ z_3 &\rightarrow \max, \\ k_4 &\rightarrow \max, \\ k_6 &\rightarrow \min. \end{aligned} \right\}, \quad (3.29)$$

где δ_y – постоянная величина, показывающая величину ущерба из-за отказа СЭ при заложенном сроке службы ДМ t_{cc} , руб.

Рассмотрим функцию связи стоимости системы энергоснабжения с условиями эксплуатации ДМ:

$$C = f(P^3; Q_o(t); m_{CЭ}; l_{нп}; l_{в}; p). \quad (3.30)$$

Стоимость СЭ формируется из следующих слагаемых:

$$C = C_o + C_{и} + C_{д}, \quad (3.31)$$

где C_o – стоимость оборудования, руб.; $C_{и}$ – стоимость источника, руб.; $C_{д}$ – стоимость дополнительного оборудования, руб.

Стоимость оборудования можно рассмотреть в нескольких вариантах функции связи, например, через массу элементов СЭ $m_{CЭ}$. Путем преобразований ее можно выразить через мощность, так как мощность и масса характеризуют динамические свойства объекта:

$$C_o = c_o(b + k_2 z_2), \quad (3.32)$$

где c_o – удельная стоимость энергооборудования СЭ, руб./Вт.

Стоимость источника зависит от типа привода (гидравлический, механический, электрический).

Для гидравлического источника $C_{иГ}$ примем, что им является насос водоподдачи, который не относится к СЭ. Тогда стоимостные показатели гидравлического источника:

$$C_{иГ} = Э_{Г} + П_{Г}, \quad (3.33)$$

где $Э_{Г}$ – эксплуатационные затраты на гидравлический источник энергии, руб.;

$П_{Г}$ – затраты на покрытие потерь энергии источника, руб.,

или

$$C_{иГ} = l_{в}(э_{Г} + п_{Г}), \quad (3.34)$$

где $э_{Г}$ – удельные эксплуатационные затраты на единицу длины, руб./м; $п_{Г}$ – удельные затраты на покрытие потерь энергии на единицу длины, руб./м.

Для электрического источника питания СЭ рассмотрим несколько вариантов (кабельное питание, переносной генератор, аккумуляторные батареи).

Кабельное питание:

$$C_{иЭкл} = C_{Экл} + Э_{Экл} + П_{Экл}, \quad (3.35)$$

где $C_{Экл}$ – стоимость кабельной линии (КЛ), руб.; $Э_{Экл}$ – эксплуатационные затраты КЛ, руб.; $П_{Экл}$ – затраты на покрытие потерь энергии в КЛ, руб.,

или

$$C_{иЭкл} = l_{нп}(c_{Экл} + э_{Экл} + п_{Экл}), \quad (3.36)$$

где $c_{Экл}$ – удельная стоимость кабельной линии, руб./м; $э_{Экл}$ – удельные эксплуатационные затраты на КЛ, руб./м; $п_{Экл}$ – удельные затраты на покрытие потерь на единицу длины, руб./м.

Аналогично для переносного генератора и аккумуляторных батарей (АКБ)

$$C_{иЭакб} = C_{Эакб} + Э_{Эакб} + C_{Эсол} = C_{акб}; \quad (3.37)$$

$$C_{иЭг} = C_{Эг} + Э_{Эг} + П_{Эг} = C_{г}, \quad (3.38)$$

где $C_{акб}$ – стоимость комплекта источника СЭ на аккумуляторной батарее с использованием солнечных панелей, руб.; $C_{Эакб}$ – стоимость АКБ, руб.; $Э_{Эакб}$ – затраты на эксплуатацию АКБ с солнечными панелями (СП), руб.; $C_{Эсол}$ – стоимость СП, руб.; $C_{Г}$ – стоимость комплекта источника СЭ с переносным генератором, руб.; $C_{ЭГ}$ – стоимость переносного генератора, руб.; $Э_{ЭГ}$ – эксплуатационные затраты на переносной генератор, руб.; $П_{ЭГ}$ – затраты на покрытие потерь, руб.

Анализируя показатель стоимости системы энергоснабжения в выражении (3.31), видим, что при выборе источника энергии будет значительно изменяться стоимость оборудования, т. е. стоимость СЭ будет зависеть от типа привода и вида источника энергии. Условия выбора и расчет стоимости более подробно рассмотрим далее.

Стоимость дополнительного оборудования системы энергоснабжения определяется из необходимости получения более высокого уровня надежности или улучшения работы всей системы. В выражении (3.29) показана взаимосвязь вероятности отказов системы и стоимости вложений. Эффективность работы системы энергоснабжения можно также оценить коэффициентом готовности [118, 119] или чувствительностью регулирования управления [4], значения которых можно повысить путем установки дополнительного оборудования. Например, при критическом низком входном давлении поливной воды в ДМ не гарантируется выполнение поливной нормы, тогда для устранения этой причины на входном гидранте устанавливают бустерный насос. При этом дополнительная стоимость системы энергоснабжения $C_{д}$ увеличивается. Аналогичный пример: при низком значении напряжения питания электродвигатель не сможет выйти в номинальный режим работы и обеспечить требуемый момент на валу, обмотка станет перегреваться, что может привести к скорейшему выходу из строя. Для устранения этих причин необходимо дополнительно установить стабилизатор напряжения и/или защиту от перегрева обмоток, что также влечет за собой увеличение $C_{д}$.

Примем, что использование дополнительного оборудования сопровождается снижением вероятности отказа:

$$C_{д} = c_{д}^{\xi} (Q_{01}(t) - Q_{02}(t)), \quad (3.39)$$

где c_d – относительная стоимость дополнительного оборудования на единицу снижения вероятности отказов, руб./%; ξ – степень чувствительности системы к принятому дополнительному оборудованию; $Q_{o1}(t)$ – вероятность отказов системы без дополнительного оборудования, %; $Q_{o2}(t)$ – вероятность отказов системы после установки дополнительного оборудования, %.

Дополнительное оборудование улучшает какой-то один функционал системы и повышает надежность работы этого функционала, но в целом система может снизить свою надежность за счет появления нового (дополнительного) оборудования, которое имеет собственную вероятность отказа. Тогда согласно выражению (3.39), оправданным будет применение дополнительного оборудования при условии:

$$Q_{o2}(t) < Q_{o1}(t). \quad (3.40)$$

Если представить вероятность отказа системы энергоснабжения ДМ с дополнительным оборудованием

$$Q_{o2}(t) = \iota Q_{o1}(t) = \iota Q_o(t), \quad (3.41)$$

где ι – коэффициент снижения вероятности отказа, $0 < \iota < 1$,

то дополнительная стоимость системы:

$$C_d = c_d^\xi Q_o(t) (1 - \iota). \quad (3.42)$$

С учетом полученных данных оптимальное значение показателя стоимости:

$$\left. \begin{aligned} k_{4i} &= c_0(b + k_{2i}z_2) + z_5(c_{иЭкли} + \varepsilon_{иЭкли} + \Pi_{иЭкли}) + (c_d^\xi k_5(1 - \iota)), \\ k_{4j} &= c_0(b + k_{2j}z_2) + z_6(\varepsilon_{Гj} + \Pi_{Гj}) + (c_d^\xi k_5(1 - \iota)), \\ k_2 &\rightarrow \min, \\ z_2 &\rightarrow \min, \\ z_5 &\rightarrow \min, \\ z_6 &\rightarrow \min, \\ k_5 &\rightarrow \min. \end{aligned} \right\}, \quad (3.43)$$

где $c_{иЭкли}$ – показатель удельной стоимости кабельной линии i -го варианта, $\varepsilon_{иЭкли}$ – показатель удельных эксплуатационных затрат i -го варианта; $\Pi_{иЭкли}$ – показатель удельных затрат на покрытие потерь энергии i -го варианта; $\varepsilon_{Гj}$ – показатель

удельных эксплуатационных затрат j -го варианта; $\pi_{Гj}$ – показатель удельных затрат на покрытие потерь энергии j -го варианта.

Эксплуатационные затраты – один из важных показателей системы энергоснабжения, который характеризует большую часть ее показателей. Однако на начальном этапе их оценить сложно, так как оборудование проходит процесс приработки. На этом этапе оно может проходить этот процесс при разных режимах потребления энергии (от оптимальных до расточительных) и при разных режимах скорости падения надежности.

Оценим эксплуатационные затраты [63, 64, 118] и определим функцию связи условий эксплуатации и параметров СЭ:

$$z = f(l_{в}; l_{нп}; P'; S; m_{СЭ}; \Delta\Pi; Q_o(t)). \quad (3.44)$$

Эксплуатационные затраты складываются из следующих составляющих:

$$z = z_p + z_{ТОР} + z_y, \quad (3.45)$$

где z_p – затраты на энергопотребление (ресурс, энергию) системы энергоснабжения, руб.; $z_{ТОР}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонт СЭ, руб.; z_y – затраты на покрытие ущерба из-за отказов или простоя оборудования СЭ, руб.

$$z_p = c_p \Sigma P t_p, \quad (3.46)$$

где c_p – цена за единицу ресурса, руб./кВт·ч; t_p – продолжительность работы источника СЭ, ч.

$$z_{ТОР} = T_{ТОР} \tau_{ч}, \quad (3.47)$$

где $T_{ТОР}$ – трудоемкость работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования за сезон, чел.-ч; $\tau_{ч}$ – часовая тарифная ставка обслуживающего персонала, руб./чел.-ч;

$$T_{ТОР} = t_{1м} l_{в} + t'_{1м} l_{нп} + t_{1кг} m_{СЭ} + \Delta T, \quad (3.48)$$

где $t_{1м}$ – нормативная трудоемкость технического обслуживания и ремонта (ТОР) линии водопровода, чел.-ч/м; $t'_{1м}$ – нормативная трудоемкость ТОР линии, чел.-ч/м; $t_{1кг}$ – нормативная трудоемкость ТОР единицы массы, чел.-ч/кг; $\Delta T_{ТОР}$ – дополнительная трудоемкость, чел.-ч.

Затраты на покрытие ущерба:

$$z_y = R + z'_y, \quad (3.49)$$

где R – размер риска – показатель ущерба как вероятностной характеристики за период времени t (ч), руб.; z'_y – затраты на мероприятия по повышению надежности и снижению вероятности отказа за период времени t (ч), руб.

Риск R появления ущерба Y_o – это вероятностный показатель, который рассматривается на интервале времени t :

$$R = Y_o Q_o(t). \quad (3.50)$$

Как видно из выражения (3.50), риск в каждый момент времени эксплуатации имеет различные значения, так как вероятность отказа будет изменяться. В данном исследовании примем допущение, что ущерб оценивается как недополучение прибыли за этот срок:

$$Y_o = \Delta\Pi - \Delta\Pi_\phi = \Delta\Pi (1 - \rho), \quad (3.51)$$

где $\Delta\Pi_\phi$ – фактическая прибыль от применения ДМ с конкретной системой энергообеспечения, руб.; ρ – относительный показатель фактической прибыли.

Затраты на мероприятия по повышению надежности и снижению вероятности отказа можно записать следующим образом:

$$z'_y = z_{yуд}^\Psi (Q_{o1}(t) - Q_{o2}(t)), \quad (3.52)$$

где $z_{yуд}$ – удельные затраты на профилактические мероприятия для повышения надежности, руб./%; Ψ – показатель степени эффективности профилактического мероприятия.

Если в выражении (3.52) вероятность отказа без выполнения профилактических мероприятий вынести за скобку, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{o2}(t)}{Q_{o1}(t)} &= g_o, \\ g_o &< 1. \end{aligned} \right\}, \quad (3.53)$$

где g_o – показатель эффективности профилактических мероприятий.

Если вероятность отказа без мероприятий обозначить как $Q_o(t) = Q_{o1}(t)$, тогда подставив в выражение (3.49) выражения (3.50)–(3.53), получим:

$$z_y = Q_o(t)(\Delta\Pi(1-\rho) + z_{yуд}^\Psi(1-g_o)). \quad (3.54)$$

Целевая функция связи эксплуатационных затрат, используя условные обозначения, имеет вид:

$$k_6 = c_p(b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кг} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + z_{уд}^{\psi} (1 - g_o)). \quad (3.55)$$

В выражении (3.55) все показатели качества СЭ и процесса полива связаны прямолинейной зависимостью, т. е. в наилучшем случае меньшее значение показателя k_6 оказывается при минимальных значениях связанных параметров.

Возможные варианты систем энергоснабжения будут различаться массой энергооборудования и комплектующих элементов. Это очевидно, так как используют разные виды энергии и этапы ее преобразования.

Масса как основной параметр динамической системы определяет уровень энергопотребления. В нашем исследовании она связана со следующими показателями:

$$m_{СЭ} = f(m_{пн}; S; P; Q_o(t); C). \quad (3.56)$$

Масса складывается из составляющих:

$$m_{СЭ} = m_0 + m_д, \quad (3.57)$$

m_0 – основная масса оборудования и комплектующих, обусловленная параметрами процесса полива, кг; $m_д$ – масса дополнительного оборудования системы энергоснабжения, предназначенного для улучшения работы ДМ, кг.

Основная масса энергооборудования имеет зависимость с суммарной мощностью СЭ. В выражении (3.13) суммарная мощность СЭ также связана с параметрами поливной нормы и площадью полива, поэтому упрощенно можно записать:

$$m_0 = m_y \Sigma P, \quad (3.58)$$

где m_y – удельная масса мощности системы, кг/кВт.

Или

$$k_{70} = m_y (b + k_2 z_2). \quad (3.59)$$

Представим, что масса дополнительного оборудования (например, масса предохранителей, стабилизатора напряжения, дополнительных муфт и т. п.)

улучшает работу СЭ. В этом смысле определить связь массы и вероятности отказа сложно.

Представим, что масса дополнительного оборудования снижает интенсивность отказов:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= m_{\text{СЭ}}\gamma, \\ \lambda_2 &= (m_{\text{СЭ}} + m_{\text{Д}})\gamma, \\ \lambda_2 &< \lambda_1, \end{aligned} \right\}, \quad (3.60)$$

где γ – удельная относительная величина интенсивности отказов на единицу массы, $1/(\text{кг} \cdot \text{год})$; λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов соответственно без дополнительного оборудования и с дополнительным оборудованием, год^{-1} .

Подставим (3.60) в выражение для вероятности отказа (3.22) и после преобразований получим:

$$Q_0(t) = 1 - e^{-\frac{\gamma\lambda t(1-\varepsilon)}{m_{\text{Д}}(1+\chi)}}, \quad (3.61)$$

где ε – доля снижения интенсивности отказов из-за внедрения дополнительного оборудования; χ – относительное превышение дополнительной массы к основной массе системы; $\lambda = \lambda_2$.

Тогда дополнительная масса:

$$m_{\text{Д}} = \frac{\gamma\lambda t(1-\varepsilon)}{\ln\left(\frac{1}{1-Q_0(t)}\right)(1+\chi)}. \quad (3.62)$$

Существуют различные материалы, которые обладают меньшей удельной массой. Например, алюминиевый проводник имеет меньшую массу по сравнению с медным проводником того же объема. Более новая деталь имеет меньшую массу, чем такая же деталь старого образца. В этом случае рассмотрим такого рода замену как дополнительное снижение массы.

Рассмотрим снижение массы системы на примере замены тяжелого материала m_{01} более легким m_{02} материалом с большей стоимостью:

$$\left. \begin{aligned} C_{01} &= m_{01}c_1, \\ C_{02} &= m_{02}c_2, \\ m_{02} &< m_{01}, \\ C_{02} &> C_{01}, \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

где c_1, c_2 – удельная стоимость 1 кг заготовки (конструкции) соответственно тяжелого и легкого материалов, руб./кг.

Разность этих масс:

$$m_{\text{д}} = \frac{C(c_2 - c_1\zeta)}{c_1c_2}, \quad (3.64)$$

где ζ – относительные затраты на снижение массы СЭ.

Анализируя полученное выражение (3.64) и выражение (3.63), определим, что дополнительная масса будет иметь отрицательное значение, т. е. более дорогое оборудование имеет меньшую массу. Преобразуем выражение (3.64) следующим образом:

$$-m_{\text{д}} = \frac{C(c_1\zeta - c_2)}{c_1c_2}. \quad (3.65)$$

С учетом полученных выражений (3.63)–(3.65) целевая функция связи массы элементов СЭ имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} k_7 &= m_y(b + k_2z_2) + \frac{\gamma\lambda t(1-\varepsilon)}{\ln\left(\frac{1}{1-k_5}\right)(1+\chi)} - \frac{k_4(c_1\zeta - c_2)}{c_1c_2} \rightarrow \min, \\ k_2 &\rightarrow \min, \\ z_2 &\rightarrow \min, \\ k_5 &\rightarrow \min, k_5 \neq 0 \\ k_4 &\rightarrow \max \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

На основе полученных целевых функций связи параметров системы энергообеспечения ДМ с условиями эксплуатации необходимо установить общую целевую функцию связи результирующего показателя – вектора. Как видно, некоторые параметры зависят друг от друга и встречаются несколько раз в целевых функциях. Например, показатель надежности k_5 влияет на стоимость, массу, эксплуатацион-

ные затраты и т. п. При учете показателя надежности так или иначе будут охвачены связанные с ним параметры процесса и показатели качества системы.

Подробный учет всех параметров и показателей может привести к трудности определения значения результирующего показателя эффективности, поскольку сложность связей приведет к выявлению дополнительных параметров, для определения влияния которых нужно будет проводить дополнительные исследования (например, влияние скорости ветра на мощность системы или влияние ультрафиолетового излучения на надежность работы электрооборудования – старение изоляции).

Примем к детальному рассмотрению показатели, которые имеют случайный характер. К ним относятся КПД, вероятность отказа и стоимость системы энергоснабжения. Они достаточно полно характеризуют СЭ и имеют более тесную взаимосвязь с другими показателями и условиями эксплуатации. Вместе с этим для каждого варианта СЭ, как показали исследования, их определяют по-разному. Установить единую целевую функцию показателей для множества допустимых вариантов СЭ возможно только с помощью весовых коэффициентов.

3.2 Обоснование функции обобщающего критерия эффективности системы энергоснабжения

Результирующий показатель качества $V_{кр} (k_1)$ оценивает систему энергоснабжения ДМ в совокупности со всеми показателями условий эксплуатации таблицы 3.1. Его определение на основе функций связи из параграфа 3.1 позволит установить количественное отношение показателей системы и параметров условий эксплуатации. Сравнение значений $V_{кр}$ имеющихся вариантов гидравлических, механических и электрических систем позволит выбрать оптимальную систему. Тот вариант системы будет оптимальным, где значение $V_{кр}$ меньше. Однако количественная оценка показателя системы по сравнению с векторным синтезом является несколько ограниченной. Причина в том, что показатель качества всегда определяет оптимальную систему по условиям, например:

1-й случай:

$$V_{\text{крГ}} < V_{\text{крЭ}}; \quad (3.67)$$

2-й случай:

$$V_{\text{крГ}} > V_{\text{крЭ}}; \quad (3.68)$$

3-й случай:

$$V_{\text{крГ}} = V_{\text{крЭ}}. \quad (3.69)$$

Очевидно, что в первом случае лучше гидравлическая система $V_{\text{крГ}}$, во втором – электрическая $V_{\text{крЭ}}$, а в третьем случае обе системы обладают одинаковым качеством. Другими словами, могут возникнуть случаи неоднозначного выбора, что является недостатком только количественной оценки показателя. Поэтому сравнение критериев эффективности необходимо рассмотреть на основе векторного синтеза.

При векторном синтезе выбор системы рассматривают с участием дополнительных критериев. Например, сравнивая электрическую и гидравлическую системы при определении величины результирующего показателя, электрическая окажется с меньшим значением, но если учесть, например, выгодное расположение поливного участка, где эксплуатационные затраты на гидравлическую систему в 3 раза ниже, то, принимая во внимание еще один показатель качества, наилучшей системой будет гидравлическая. Векторный синтез охватывает рассматриваемую систему в пространстве действия многих показателей, которые в разной степени влияют на работу системы. Отсюда следует, что результирующий показатель качества может быть рассмотрен в качестве рядового показателя качества, а результирующим будет, например, стоимость системы.

Обобщающий критерий может быть учтен на основе эксплуатационных затрат, а различные варианты систем энергоснабжения для дождевальнй машины с конкретными условиями эксплуатации будут сравниваться по эксплуатационным затратам. Однако оценить энергопотребление в структуре эксплуатационных затрат можно с разных позиций. Затраты на ресурс определяются произведением цены на ресурс и количеством потребленной энергии. Тогда при одних и тех же затратах в первом случае цена на ресурс высокая с малым потреблением энергии, а во втором – высокое потребление энергии с малой ценой на ресурс составят одинаковые эксплуатационных затраты. С учетом того, что тарифы на ресурс из-

меняются часто, в любых условиях эксплуатации оптимальной будет система энергоснабжения с оборудованием, работающая на энергии, цена на которую будет иметь низкое значение. Поэтому на данном этапе исследования необходимо принять новый обобщающий критерий эффективности, учитывающий стоимость и количество потребленной энергии, то есть произведение количества потребленной энергии W на сумму стоимости и эксплуатационных затрат с учетом показателя ее КПД:

$$V_{\text{кр}} = \frac{W(C+z)}{(1-\eta')}. \quad (3.70)$$

Стоимость системы C не зависит от времени. Эксплуатационные затраты z и энергия, потребленная системой энергоснабжения ДМ W , являются функциями, зависящими от времени:

$$W = f(t_p); \quad (3.71)$$

$$z = f(t_p). \quad (3.72)$$

Запишем полное выражение функции критерия эффективности:

$$V_{\text{кр}} = \frac{(b+k_2z_2)t_p \left[k_4 + \text{ц}_p(b+k_2z_2)t_p + (t_{1\text{м}}z_5 + t'_{1\text{м}}z_6 + t_{1\text{кр}}k_7)\tau_{\text{ч}} + k_5(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\text{в}}(1-g_0)) \right]}{(1-k_3)}. \quad (3.73)$$

Интегрированием выражения (3.73) по продолжительности времени действия показателей за один полив t_0 , при сезонном использовании $t_{\text{сез}}$ и на всем сроке эксплуатации $t_{\text{ср}}$ можно получить решение обобщающего показателя эффективности:

$$V_{\text{кр-о}} = \int_0^{t_0} \frac{(b+k_2z_2)t_p \left[k_4 + \text{ц}_p(b+k_2z_2)t_p + (t_{1\text{м}}z_5 + t'_{1\text{м}}z_6 + t_{1\text{кр}}k_7)\tau_{\text{ч}} + k_5(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\text{в}}(1-g_0)) \right]}{(1-\eta')} dt; \quad (3.74)$$

$$V_{\text{кр-сез}} = \int_0^{t_{\text{сез}}} \frac{(b+k_2z_2)t_p \left[k_4 + \text{ц}_p(b+k_2z_2)t_p + (t_{1\text{м}}z_5 + t'_{1\text{м}}z_6 + t_{1\text{кр}}k_7)\tau_{\text{ч}} + k_5(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\text{в}}(1-g_0)) \right]}{(1-\eta')} dt; \quad (3.75)$$

$$V_{\text{кр-ср}} = \int_0^{t_{\text{ср}}} \frac{(b+k_2z_2)t_p \left[k_4 + \text{ц}_p(b+k_2z_2)t_p + (t_{1\text{м}}z_5 + t'_{1\text{м}}z_6 + t_{1\text{кр}}k_7)\tau_{\text{ч}} + k_5(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\text{в}}(1-g_0)) \right]}{(1-\eta')} dt. \quad (3.76)$$

Перед решением интегралов представим продолжительность работы ДМ как параметр системы. Продолжительность работы ДМ определяется поливной

нормой для конкретной культуры. Обычно, согласно справочным данным [187, 261–263], оросительная норма, например, для пшеницы составляет 2500 м³/га, для кукурузы – 6000 м³/га. Если рассмотреть продолжительность работы машины [187] за сезон через параметры полива, то получим:

$$t_{\text{сез}} = \frac{5}{18} \frac{m_{\text{он}}}{q}, \quad (3.77)$$

где $m_{\text{он}}$ – оросительная норма, м³/га; q – гидромодуль дождевальной машины, м³/га/ч.

Если гидромодуль ДМ представить

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (3.78)$$

где Q – подача насоса, м³/ч,

то продолжительность работы за сезон:

$$t_{\text{сез}} = \frac{5}{18} \frac{m_{\text{он}} S}{Q}. \quad (3.79)$$

Подача насоса снижается с удаленностью поливного участка z_6 . Выразим этот показатель через входное давление – параметр z_4 . Согласно [187, 261, 262, 296, 303], подача насоса определяется по формуле:

$$Q = \mu_p \frac{\pi d_{\text{внут}}^2}{4} \sqrt{2gH_{\text{ГТ}}}, \quad (3.80)$$

где μ_p – коэффициент расхода, зависящий от формы гидранта дождевальной машины, $\mu_p = 0,4 \dots 0,6$ [187]; $d_{\text{внут}}$ – внутренний диаметр трубопровода ДМ, присоединенного к гидранту, м; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; $H_{\text{ГТ}}$ – напор на гидранте, м:

$$H_{\text{ГТ}} = \frac{p}{\rho_B g}, \quad (3.81)$$

где p – давление потока жидкости, Па; ρ_B – плотность жидкости, кг/м³.

Подставим в (3.79) выражения (3.80) и (3.81):

$$t_{\text{сез}} = \frac{1,1 m_{\text{он}} S}{\mu_p \pi d_{\text{внут}}^2} \sqrt{\frac{\rho_B}{2p}}. \quad (3.82)$$

Тогда при поливе участка площадью S можно определить продолжительность одного оборота ДМ t_o через поливную норму $m_{\text{пн}}$:

$$t_o = \frac{1,1m_{\text{пн}}S}{\mu_p \pi d_{\text{внут}}} \sqrt{\frac{\rho_B}{2p}}, \quad (3.83)$$

или в условных обозначениях, если продолжительность одного оборота $t_o = t_p$:

$$t_p = \frac{1,1z_1z_2}{\mu_p \pi d_{\text{внут}}} \sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}. \quad (3.84)$$

Подставим в (3.74) выражение продолжительности полива (3.84), т. е. одного оборота ДМ. Получим зависимость результирующего показателя качества (показателя эффективности) системы энергоснабжения:

$$V_{\text{кр-о}} = \frac{1,1z_1z_2(b+k_2z_2) \sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} \left[k_4 + \text{Ц}_p(b+k_2z_2) \frac{1,1z_1z_2}{\mu_p \pi d_{\text{внут}}} \sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1\text{м}}z_5 + t'_{1\text{м}}z_6 + t_{1\text{кг}}k_7)\tau_ч + k_5(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\text{в}}(1-g_o)) \right]}{\mu_p \pi d_{\text{внут}}(1-k_3)}. \quad (3.85)$$

Зависимость (3.85) показателя эффективности отражает сложную взаимосвязь показателей системы энергоснабжения и условий эксплуатации. Изменение любого одного или нескольких параметров приводит к изменению показателя эффективности, что соответствует высокой чувствительности полученного выражения.

Рассмотрим диапазон изменения критерия эффективности при изменении основных показателей исследования. Как видно из таблицы 3.1, на показатель $V_{\text{кр}}$ влияет большинство параметров. Изменение одного из них приводит к изменению группы других параметров, это видно из выражений (3.11)–(3.66). При одновременном изменении сразу всех параметров поиск значения $V_{\text{кр}}$ становится невыполнимым, так как все расчеты будут сводиться к определению значений каждого параметра в отдельности, что в итоге приведет к ошибкам в расчетах. Поэтому примем допущение, что на этапе определения значений показателя k_1 значения 11 основных и 12 дополнительных параметров будут приниматься в пределах их действительных значений, а для графического представления в двумерном (трехмерном) виде при изменении одного (двух) параметров остальные принимаются постоянными.

Оптимальное значение обобщающего показателя эффективности системы энергоснабжения графически показать сложно, так как в большинстве случаев зависимости будут линейными. Задаваясь некоторыми значениями показателей как ограничениями, получим решения обобщающего показателя.

Рассмотрим трехмерные графики зависимостей $V_{кр}$, где два основных параметра изменяются в пределах допустимых значений, а остальные приняты постоянными в каждом конкретном случае.

Зависимость $V_{кр} = f(z_1, z_2)$ при $c_p = 5$ руб./кВт·ч; $d_{внут} = 0,213$ м; $b = 2$ кВт; $t_{1м} = 0,02$ чел.-ч/м; $t'_{1м} = 0,01$ чел.-ч/м; $t_{1кг} = 0,05$ чел.-ч/кг; $\rho = 0,9$; $g_o = 0,9$; $z^{\Psi}_{уд} = 2$ руб.·ч/%; $\rho_v = 1000$ кг/м³; $k_2 = 0,1$ кВт/га; $z_4 = 0,15$ МПа; $z_5 = 10$ км; $z_6 = 10$ км; $k_7 = 2000$ кг; $k_5 = 0,1$ (10 %); $k_3 = 0,4$ (40 %); $z_7 = 100$ тыс. руб.; $k_4 = 1$ млн руб., $\mu_p = 0,5$ представлена на рисунке 3.3.

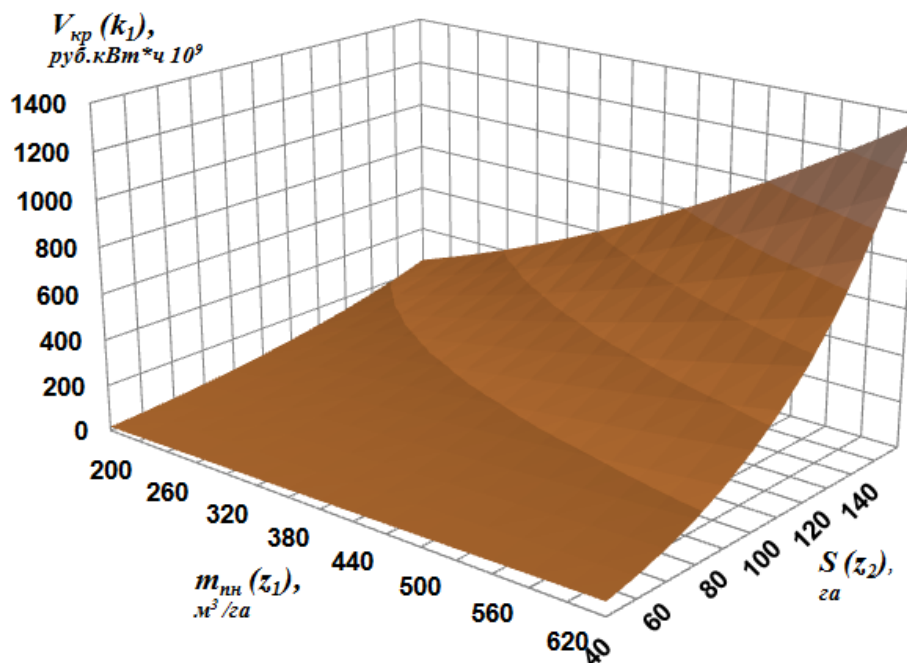
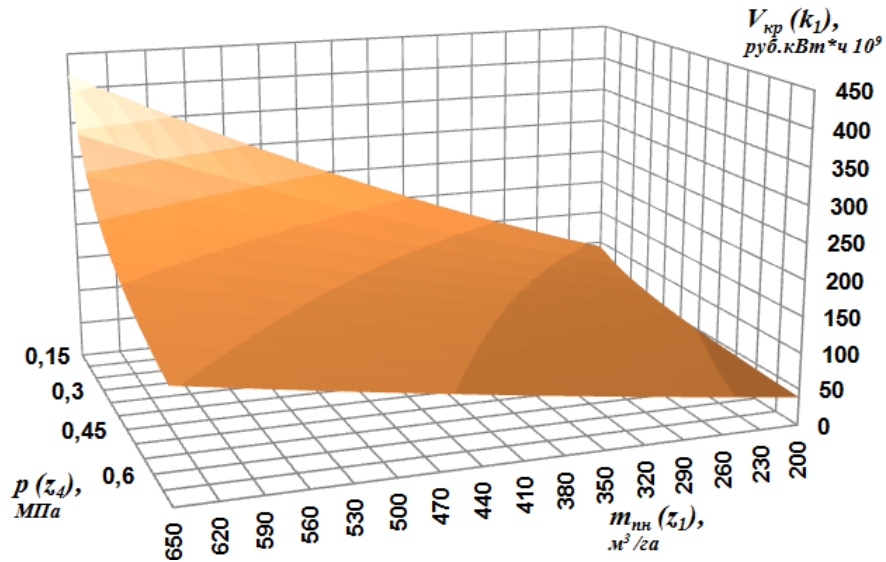
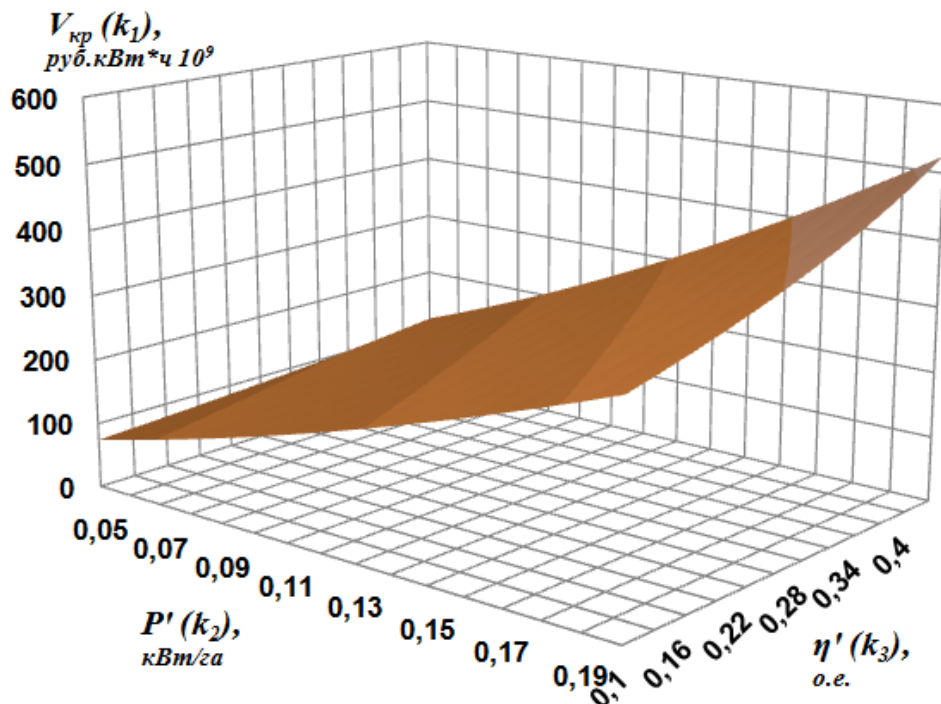


Рисунок 3.3 – Зависимость $V_{кр} = f(z_1; z_2)$

Зависимость $V_{кр} = f(z_1; z_4)$ при $c_p = 5$ руб./кВт·ч; $d = 0,213$ м; $b = 2$ кВт; $t_{1м} = 0,02$ чел.-ч/м; $t'_{1м} = 0,01$ чел.-ч/м; $t_{1кг} = 0,05$ чел.-ч/кг; $\rho = 0,9$; $g_o = 0,9$; $z^{\Psi}_{уд} = 2$ руб.·ч/%; $\rho_v = 1000$ кг/м³; $k_2 = 0,1$ кВт/га; $z_2 = 100$ га; $z_5 = 10$ км; $z_6 = 10$ км; $k_7 = 2000$ кг; $k_5 = 0,1$ (10 %); $k_3 = 0,4$ (40 %); $z_7 = 100$ тыс. руб.; $k_4 = 1$ млн руб., $\mu_p = 0,5$ представлена на рисунке 3.4.

Рисунок 3.4 – Зависимость $V_{кр} = f(z_1; z_4)$

Зависимость $V_{кр} = f(k_2; k_3)$ при $c_p = 5$ руб./кВт·ч; $d = 0,213$ м; $b = 2$ кВт; $t_{1м} = 0,02$ чел.-ч/м; $t'_{1м} = 0,01$ чел.-ч/м; $t_{1кг} = 0,05$ чел.-ч/кг; $\rho = 0,9$; $g_0 = 0,9$; $z^{\Psi}_{уд} = 2$ руб.·ч/%; $\rho_B = 1000$ кг/м³; $z_1 = 500$ м³/га; $z_2 = 100$ га; $z_5 = 10$ км; $z_6 = 10$ км; $k_7 = 2000$ кг; $k_5 = 0,1$ (10 %); $z_4 = 0,25$ МПа; $z_7 = 100$ тыс. руб.; $k_4 = 1$ млн руб., $\mu_p = 0,5$ представлена на рисунке 3.5.

Рисунок 3.5 – Зависимость $V_{кр} = f(k_2; k_3)$

Зависимость $V_{кр} = f(k_4; k_5)$ при $c_p = 5$ руб./кВт·ч; $d = 0,213$ м; $b = 2$ кВт; $t_{1м} = 0,02$ чел.-ч/м; $t'_{1м} = 0,01$ чел.-ч/м; $t_{1кг} = 0,05$ чел.-ч/кг; $\rho = 0,9$; $g_o = 0,9$; $z^{\Psi}_{уд} = 2$ руб.·ч/%; $\rho_B = 1000$ кг/м³; $z_1 = 500$ м³/га; $z_2 = 100$ га; $z_5 = 10$ км; $z_6 = 10$ км; $k_7 = 2000$ кг; $k_2 = 0,1$ кВт/га; $z_4 = 0,25$ МПа; $z_7 = 100$ тыс. руб.; $k_3 = 0,4$ (40 %), $\mu_p = 0,5$ представлена на рисунке 3.6.

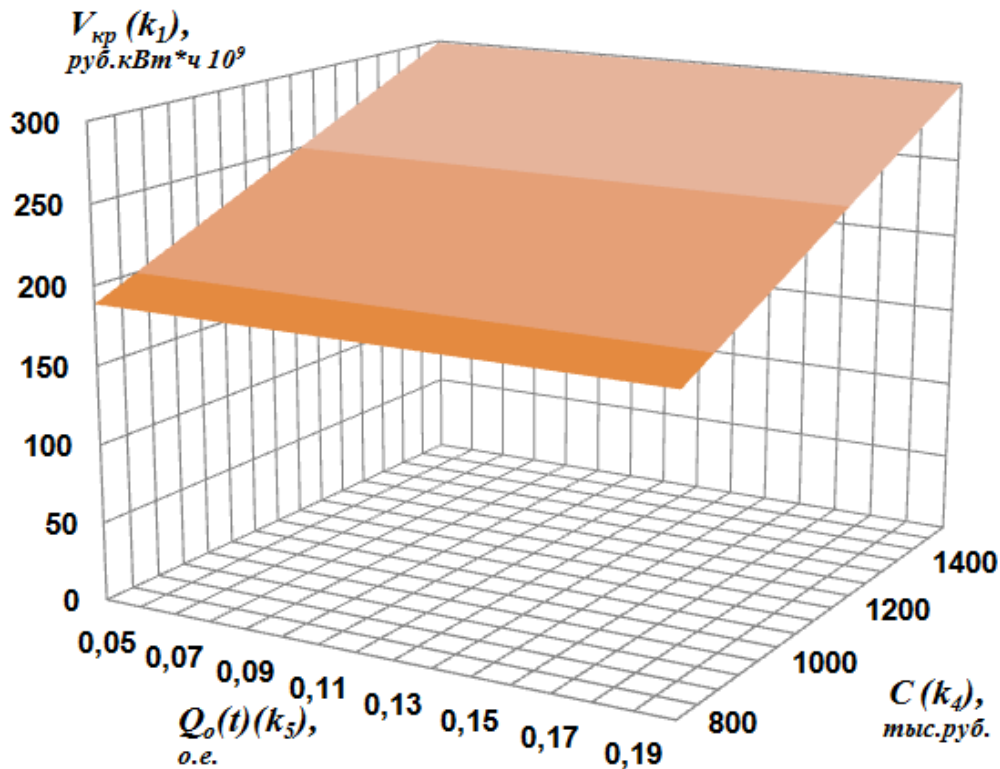
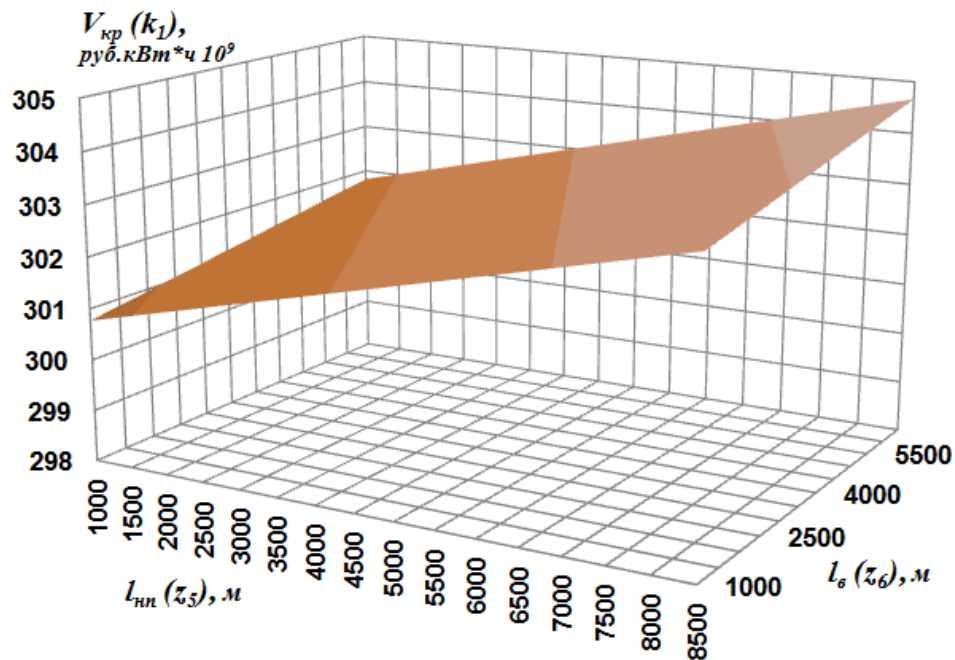
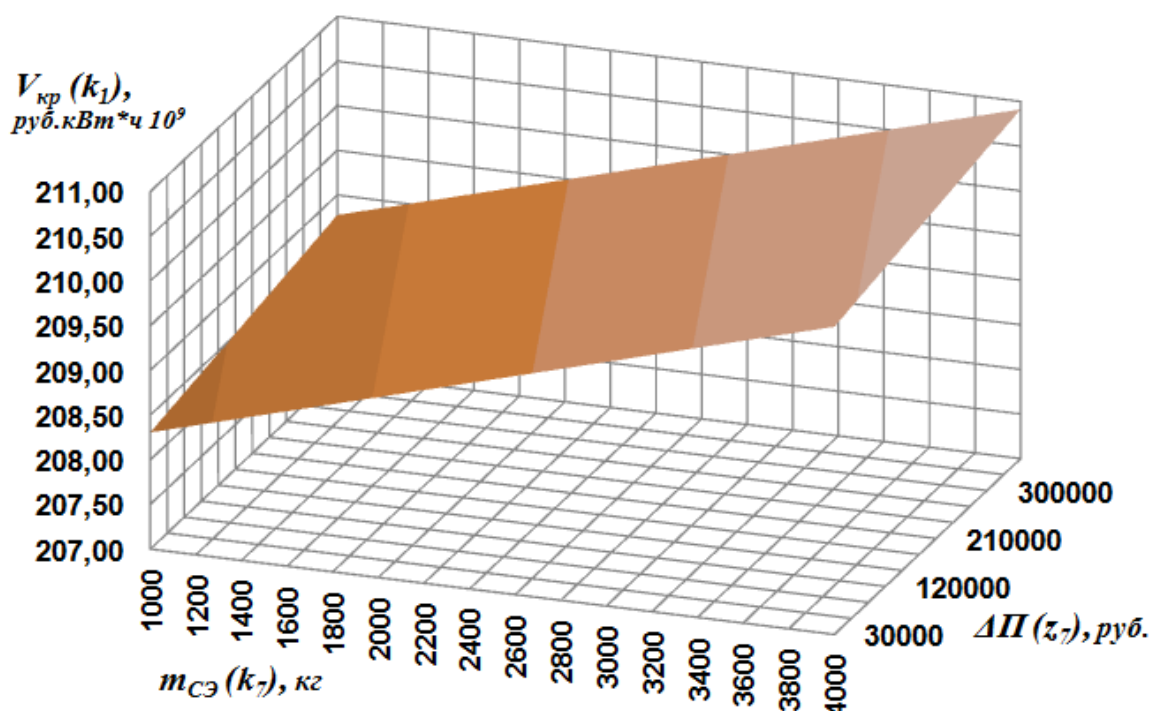


Рисунок 3.6 – Зависимость $V_{кр} = f(k_4; k_5)$

Зависимость $V_{кр} = f(z_6; z_5)$ при $c_p = 5$ руб./кВт·ч; $d = 0,213$ м; $b = 2$ кВт; $t_{1м} = 0,02$ чел.-ч/м; $t'_{1м} = 0,01$ чел.-ч/м; $t_{1кг} = 0,05$ чел.-ч/кг; $\rho = 0,9$; $g_o = 0,9$; $z^{\Psi}_{уд} = 2$ руб.·ч/%; $\rho_B = 1000$ кг/м³; $z_1 = 500$ м³/га; $z_2 = 100$ га; $k_4 = 1$ млн руб.; $k_5 = 0,1$ (10 %); $k_7 = 2000$ кг; $k_2 = 0,1$ кВт/га; $z_4 = 0,25$ МПа; $z_7 = 100$ тыс. руб.; $k_3 = 0,4$ (40 %), $\mu_p = 0,5$ представлена на рисунке 3.7.

Рисунок 3.7 – Зависимость $V_{кр} = f(z_6; z_5)$

Зависимость $V_{кр} = f(k_7; z_7)$ при $c_p = 5$ руб./кВт·ч; $d = 0,213$ м; $b = 2$ кВт; $t_{1м} = 0,02$ чел.-ч/м; $t'_{1м} = 0,01$ чел.-ч/м; $t_{1кг} = 0,05$ чел.-ч/кг; $\rho = 0,9$; $g_o = 0,9$; $z^{\Psi}_{уд} = 2$ руб.·ч/%; $\rho_v = 1000$ кг/м³; $z_1 = 500$ м³/га; $z_2 = 100$ га; $k_4 = 1$ млн руб.; $k_5 = 0,1$ (10 %); $z_5 = 10$ км; $z_6 = 10$ км; $k_2 = 0,1$ кВт/га; $z_4 = 0,25$ МПа; $k_3 = 0,4$ (40 %), $\mu_p = 0,5$ представлена на рисунке 3.8.

Рисунок 3.8 – Зависимость $V_{кр} = f(k_7; z_7)$

Таким образом, полученная целевая функция показателя эффективности позволяет установить соотношение вектора при изменении параметров системы энергоснабжения, обобщить взаимосвязь параметров систем различных приводов и условий эксплуатации ДМ. В разной степени на показатель k_1 влияют 11 основных параметров системы энергоснабжения и процесса полива, а также 12 дополнительных параметров, которые характеризуют тот или иной вариант энергоснабжения. Задаваясь конкретными данными, можно численно определить множество допустимых вариантов систем энергоснабжения согласно предложенной во 2-й главе методологии формирования энергоэффективной системы для передачи энергии движителям опорных тележек дождевальная машины (гидропривод с гидродвигателем вращательного действия, гидропривод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия с гидроцилиндром, механический привод, электрический привод с кабельной линией, электропривод с ВЛ, электропривод с переносным генератором, электропривод с АКБ).

Обобщая однотипные параметры системы энергоснабжения в выражении (3.85), запишем показатель эффективности в укрупненном виде:

$$V'_{кр-о} = A^x B^y C^z D^w, \quad (3.86)$$

где A , B , C , D – укрупненные технические, мелиоративные, конструктивные и экономические показатели, влияющие на эффективность системы; x , y , z , w – степени проявления соответственно технических, мелиоративных, конструктивных и экономических показателей.

Анализ полученных данных графиков и выражений (3.80)–(3.85) показывает, что большее влияние на эффективность системы энергоснабжения ДМ оказывают технические показатели A (мощность оборудования, показатель потерь энергии, эксплуатационные показатели), степень проявления которых лежит в интервале $1,1 < x < 2,0$. Величины потребляемой энергии и эксплуатационных затрат показателя эффективности зависят от мелиоративных показателей (площади поливного участка, поливной нормы, давления на гидранте ДМ) несколько прямолинейно со степенью проявления $1,01 < y < 1,2$. Конструктивные и экономические показатели имеют субъективный характер и относятся к региону применения.

3.3 Дискретный выбор системы энергоснабжения

Теоретические исследования в п. 3.1–3.2 сводятся к тому, чтобы из множества вариантов выбрать оптимальную систему энергоснабжения ДМ в конкретных условиях эксплуатации. Классическая теория оптимизации в этом случае не даст положительных решений, так как число вариантов не более 50, а также они существенно отличаются друг от друга, при этом по рисункам 3.3–3.8 не наблюдается выраженных оптимумов, поэтому рассмотрим теорию дискретного выбора.

При дискретном выборе системы энергоснабжения множество M_d допустимых вариантов (систем) состоит из конечного числа решений A_1, A_2, \dots, A_m . Число этих вариантов равно числу рассматриваемых (сравниваемых) систем (гидропривод, механический привод, электропривод). Например, на рисунке 3.9 приведено множество M_d , содержащее m вариантов. Каждой точке A_i соответствует значение $k_1 = \langle k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7 \rangle$, зависящее от параметров системы, и $k_1 = \langle z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7 \rangle$, зависящее от условий эксплуатации ДМ.

Из множества вариантов не все являются лучшими по условию минимума показателя эффективности $V_{кр}(k_1) \rightarrow \min$, т. е. из вариантов (см. рисунок 3.9) часть точно являются худшими, которые при выборе допускается не учитывать.

Разобьем множество M_d на множества худших M_x и лучших M_n .

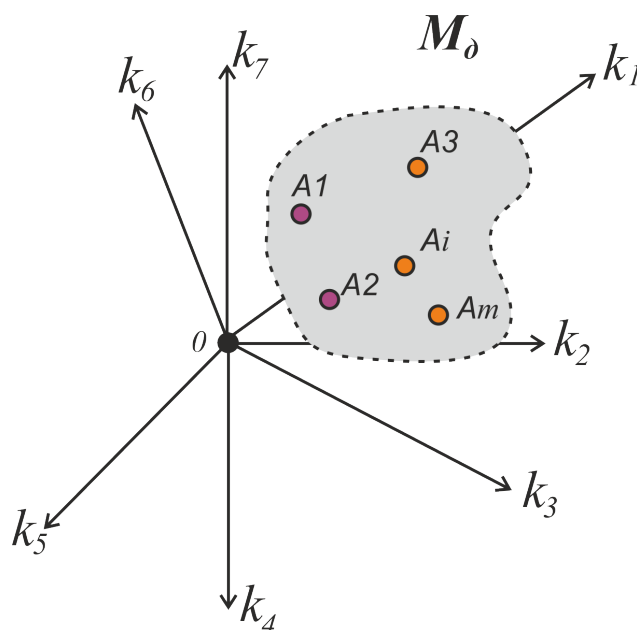


Рисунок 3.9 – Множество допустимых вариантов энергоснабжения в пространстве показателей качества

Но абсолютно лучших точек нет, так как все варианты рассматриваются относительно 7 основных показателей качества. Поэтому назовем множество лучших вариантов множеством нехудших вариантов с учетом условия $V_{кр}(k_1) \rightarrow \min$.

Рассмотреть в многомерном пространстве данные варианты A_1, A_2, \dots, A_m сложно, так как графически правильно построить и точно изобразить зависимости нельзя. Поэтому рассмотрим изменение показателя качества k_1 с учетом функционально-структурных коэффициентов эффективности вариантов и весовых коэффициентов значимых показателей качества в 2-мерной системе координат, где параметрами по осям ординат и абсцисс принимаются показатели таблицы 3.1 (рисунок 3.10), а остальные параметры вводятся как ограничения или константы.

Рассмотрим, например, точку $A_{ГД}$ (см. рисунок 3.10). Эта точка является худшей, так как во множестве M_d существует безусловно лучшая точка (например, точка A_M). Точка A_M также худшая, так как существует безусловно лучшая по сравнению с ней точка $A_{Эвл}$.

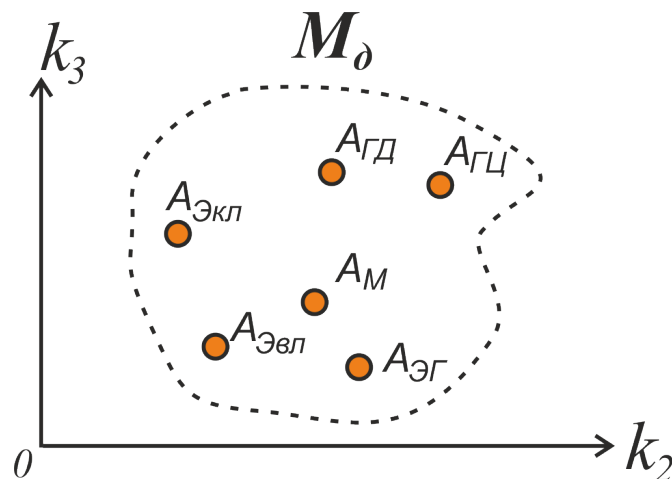


Рисунок 3.10 – Множество допустимых вариантов энергоснабжения в 2-мерной системе координат показателей качества

Точка A_M оказывается нехудшей по показателю качества k_3 , так как во множестве M_d не существует безусловно лучшей по сравнению с нею точки (например, точки $A_{Экл}$ и $A_{ГД}$ имеют большие значения показателя k_3 , но зато точка $A_{Экл}$ имеет меньшее значение показателя k_2 и вследствие этого нельзя считать их безусловно лучшими, чем A_M). Точка $A_{ЭГ}$ также относится к классу нехудших, а точка $A_{ГЦ}$ является худшей (так как точка A_M безусловно лучше, чем $A_{ГЦ}$). Таким образом, в данном случае множества нехудших M_n состоит из точек $A_{Экл}$, $A_{Эвл}$ и $A_{ЭГ}$, а

множество худших M_x – из точек $A_{ГД}$, A_M , и $A_{ГЦ}$. Тогда в дальнейшем к рассмотрению примем множество нехудших вариантов. Условимся называть геометрическое место нехудших вариантов оптимальной, или наилучшей «поверхностью». В случае двух показателей качества, когда используют 2-мерную систему координат, «поверхность» оказывается одномерной и ее удобно называть левой нижней границей области M_d . Для множества M_d (рисунок 3.11) левая нижняя граница состоит всего из трех точек – $A_{Экл}$, $A_{Эвл}$ и $A_{ЭГ}$.

Если в данную 2-мерную условную систему ввести дополнительный параметр, то множество допустимых вариантов M'_d изменится, а варианты различных систем поменяют свои положения в данной координатной системе.

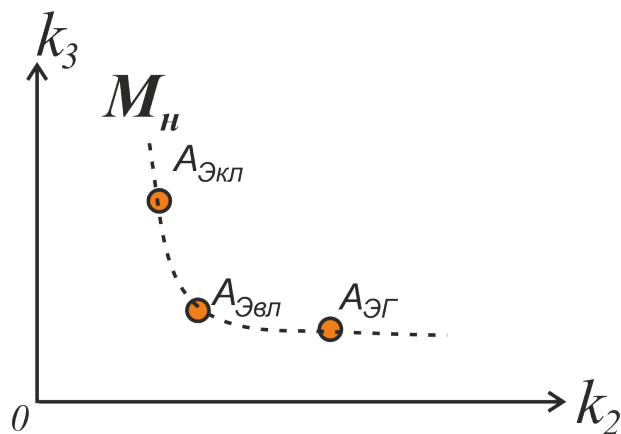


Рисунок 3.11 – Множество нехудших M_n вариантов энергоснабжения из множества M_d (см. рисунок 3.10)

Изложенный метод выбора относится только к 2-мерному графическому изображению определения границ применения. Его можно использовать, когда другие показатели качества СЭ и условий эксплуатации в допустимых пределах можно принять постоянными. Однако некоторые показатели (например, давление на входе в ДМ – z_4 ; поливная норма – z_1 ; эксплуатационные затраты – k_6 и т. п.) могут произвольно изменяться в течение сезона или даже единовременного полива. Для таких случаев необходимо рассматривать влияние третьего, четвертого и т. д. показателей качества или процесса.

Тогда рассмотрим множество M'_d , которое содержит большее число вариантов и, например имеет вид, изображенный на рисунке 3.12. В этом случае отыскание

k_3 . Следовательно, их исключают из дальнейшего рассмотрения. Все точки правее прямой $A_{ЭГ2}BE$ (или на этой прямой, но выше точки $A_{ЭГ2}$) хуже точки $A_{ЭГ2}$ по совокупности обоих показателей качества k_2 и k_3 . Следовательно, они также должны быть исключены из рассмотрения.

4. Внутри прямоугольника $A_{Экл1}BA_{ЭГ2}C$ проводим вертикальную прямую через самую левую точку (точки) и горизонтальную прямую через самую нижнюю точку (точки). Тогда самая нижняя точка на вертикальной прямой (точка $A_{Экл2}$) и самая левая точка на горизонтальной прямой (точка $A_{М2}$) будут следующими точками левой нижней границы.

5. Проведем через точку $A_{Экл2}$ горизонтальную прямую, а через точку $A_{М2}$ вертикальную прямую. Тогда все остальные точки левой нижней границы могут быть расположены лишь внутри прямоугольника $A_{Экл2}FA_{М2}G$. Далее процедура продолжается в том же порядке. В рассматриваемом примере (см. рисунок 3.12) в ее продолжении нет необходимости, так как внутри прямоугольника $A_{Экл2}FA_{М2}G$ оказалась всего одна точка ($A_{Эвл1}$), которая и является последним искомым вариантом левой нижней границы.

Таким образом, в рассмотренном примере левая нижняя граница состоит из точек $A_{Эвл1}$, $A_{Экл2}$, $A_{М2}$, $A_{Экл1}$ и $A_{ЭГ2}$.

В случае множества $M'_д$, изображенного на рисунке 3.12, если внутри прямоугольника будет найдено два варианта, то они будут также нехудшими, и «поверхность» будет проходить также через эти точки.

Изложенному выше графическому методу прямоугольников эквивалентна аналитическая процедура отыскания нехудших точек [12, 101, 238], которая заключается в определении координат каждой точки.

Выше был рассмотрен один из методов отыскания левой нижней границы и границ применения вариантов по методу прямоугольника [12, 101, 238]. Рассмотрим теперь метод определения границ по рабочим характеристикам. В случае двух показателей качества он сводится к нахождению любой из следующих двух рабочих характеристик:

$$k_{1\min} = f_{p1}(k_2); \quad (3.87)$$

$$k_{2\min} = f_{p2}(k_1), \quad (3.88)$$

или

$$k_{1\min} = f_{p3}(k_3); \quad (3.89)$$

$$k_{3\min} = f_{p4}(k_1). \quad (3.90)$$

Рассмотрим сначала рабочую характеристику (3.87). Она получена минимизацией показателя k_1 при фиксированном значении показателя k_2 ; при этом минимизация осуществляется для всех допустимых значений показателя k_2 .

Для множества M''_d рабочая характеристика (3.87) имеет вид, изображенный на рисунке 3.13, а. Она включает в себя все нехудшие точки ($A_{\text{Экл}1} - A_{\text{Экл}4}$), а также ряд худших точек ($A_{\text{Эвл}1} - A_{\text{Эвл}4}$, $A_{\text{ЭГ}1} - A_{\text{ЭГ}4}$, $A_{\text{Эакб}1} - A_{\text{Эакб}4}$, $A_{M1} - A_{M2}$, $A_{ГД1} - A_{ГД4}$, $A_{ГЦ1} - A_{ГЦ4}$).

Для отсеивания из рабочей характеристики худших точек, т. е. выделения границы, можно применить различные способы, например, описанный в [101].

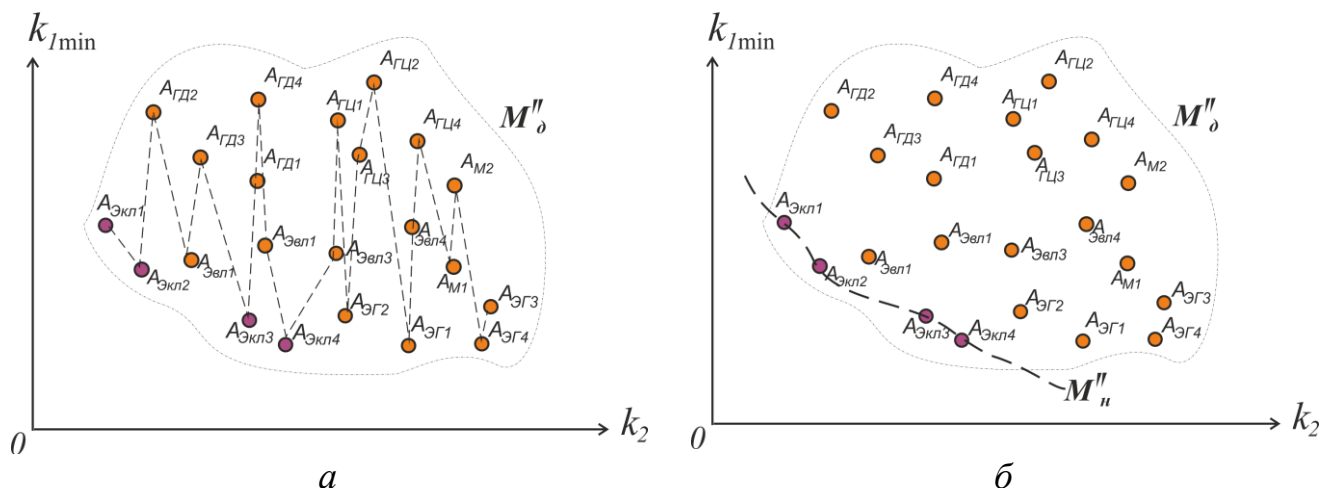


Рисунок 3.13 – Множество допустимых вариантов M''_d первой рабочей характеристики

Сначала находим крайнюю левую точку этой границы, которая совпадает с самой левой точкой рабочей характеристики (точкой $A_{\text{Экл}1}$ на рисунке 3.13, а). Затем находим крайнюю правую (нижнюю) точку левой нижней границы, которая совпадает с самой нижней точкой рабочей характеристики (если рабочая характеристика имеет несколько нижних точек, например точки $A_{\text{Экл}4}$, $A_{\text{ЭГ}1}$ и $A_{\text{ЭГ}4}$ на рисунке 3.13, а, то следует выбрать самую левую из этих точек). Такими крайними точками левой нижней границы являются $A_{\text{Экл}1}$ и $A_{\text{Экл}4}$. Остальные точки левой нижней границы (расположенные между точками $A_{\text{Экл}1}$ и $A_{\text{Экл}4}$) без труда могут

быть выделены из рабочей характеристики, если учесть, что левая нижняя граница на всем ее протяжении является монотонной, т. е. приобретает свойство монотонности [101]. Так, например, из рисунка 3.13, *а* ясно, что точки $A_{Эвл1} - A_{Эвл4}$, $A_{ЭГ1} - A_{ЭГ4}$, $A_{Эакб1} - A_{Эакб4}$, $A_{М1} - A_{М2}$, $A_{Гд1} - A_{Гд4}$ и $A_{Гц1} - A_{Гц4}$ не могут принадлежать строго монотонной границе, проходящей через точки $A_{Экл1}$ и $A_{Экл4}$, следовательно, должны быть отброшены. В более сложных случаях для отсеивания худших точек можно применить к точкам рабочей характеристики описанный выше метод прямоугольника. Таким образом, отсеивая из рабочей характеристики рисунка 3.13, *а* худшие точки, нетрудно найти, что граница имеет вид, изображенный на рисунке 3.13, *б*.

Для отыскания левой нижней границы вместо рабочей характеристики (3.87) можно с равным правом использовать рабочую характеристику (3.88), получаемую минимизацией показателя k_2 для фиксированного (но произвольного) значения показателя k_1 . Например, множеству $M''_д$, изображенному на рисунке 3.14, соответствует рабочая характеристика (3.88). Она содержит все нехудшие варианты ($A_{Экл1} - A_{Экл4}$), а также ряд худших вариантов ($A_{Эвл1} - A_{Эвл4}$, $A_{ЭГ1} - A_{ЭГ4}$, $A_{Эакб1} - A_{Эакб4}$, $A_{М1} - A_{М2}$, $A_{Гд1} - A_{Гд4}$ и $A_{Гц1} - A_{Гц4}$). Производя отсеивание худших точек, получим левую нижнюю границу, изображенную на рисунке 3.13, *б*.

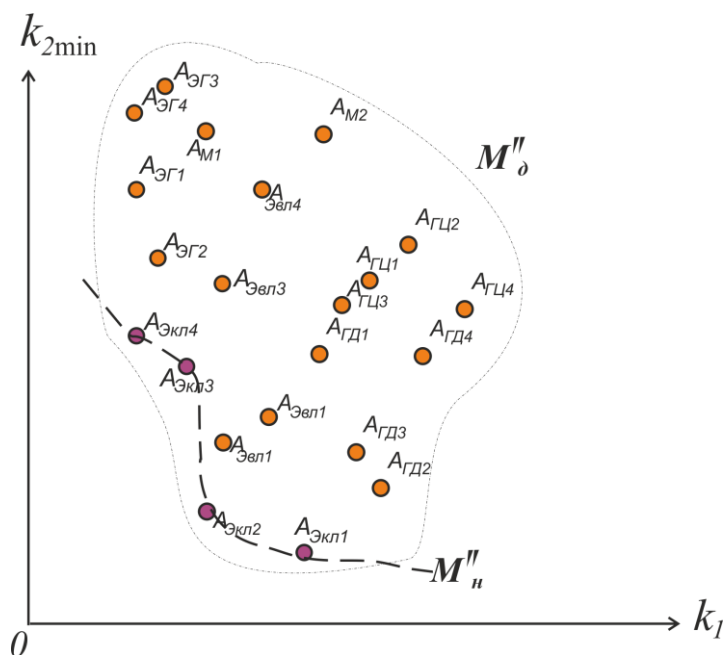


Рисунок 3.14 – Множество допустимых вариантов $M''_д$ второй рабочей характеристики (3.88)

Приведенные примеры подтверждают свойства рабочих характеристик, состоящие в том, что любая из рабочих характеристик содержит все нехудшие варианты, но может содержать, кроме того, и ряд худших вариантов. Отсеивая худшие точки, получаем тем самым искомую границу выбора варианта энергоснабжения.

Границы множества допустимых вариантов приобретают свойства монотонности, т. е. множества нехудших вариантов. Один из вариантов (например, $A_{Экл2}$) будет всегда расположен правее и ниже другой точки (например, точка $A_{Экл1}$), т. е. будет иметь большее значение показателя k_1 и меньшее значение показателя k_2 . Это означает, что ни одна из точек строго монотонной рабочей характеристики не может быть признана лучшей или худшей по сравнению с произвольной другой точкой этой характеристики. Таким образом, если мы возьмем на рабочей характеристике произвольную точку A_i , то в пределах всей рабочей характеристики не существует точки лучшей, чем A_i . Кроме того, известно, что рабочая характеристика содержит все нехудшие точки множества $M''_д$. Следовательно, варианты, не принадлежащие рабочей характеристике, заведомо являются худшими. Поэтому если в пределах всей рабочей характеристики не существует точки, лучшей, чем A_i , то тем более не существует лучшей точки множества $M''_н$ вне рабочей характеристики.

Тем самым установлено, что если на рабочей характеристике (строго монотонной) выбрана произвольная точка A_i , то в пределах $M''_н$ не существует точки лучшей, чем A_i . Но это означает, что точка A_i является нехудшей. Следовательно, произвольная (любая) точка строго монотонной рабочей характеристики является нехудшей точкой, что и требовалось доказать.

Таким образом, доказано, что строгая монотонность рабочей характеристики является необходимым и достаточным условием ее совпадения с левой нижней границей. Очевидно, это справедливо как для рабочей характеристики первого вида (уравнение (3.87)), так и для рабочей характеристики второго вида (уравнение (3.88)). Отсюда следует, в частности, что если рабочие характеристики первого и второго вида оказываются строго монотонными, то они совпадают друг с другом. В общем же случае эти рабочие характеристики совпадают не полностью, а лишь в точках, которые оказываются нехудшими.

При оптимизации параметров левая нижняя граница множества нехудших вариантов содержит бесконечное множество точек, которые в равной степени можно принять на протяжении всей бесконечной полученной поверхности. Поэтому найти всю поверхность или границу можно лишь аналитическим путем, т. е. только в случаях, когда для этой границы удастся получить точное аналитическое выражение. Однако во многих случаях получить аналитическое решение для левой нижней границы не удастся и приходится ограничиться определением лишь конечного числа ее точек. Эти точки могут быть найдены либо аналитическим путем, либо путем численных расчетов. Очевидно, при этом желательно искать не какие-либо произвольные точки, а характерные точки, дающие если не достаточно полное, то во всяком случае существенное представление о возможных нехудших системах и соответствующих им показателей качества. К таким характерным точкам левой нижней границы множества $M''_д$ в первую очередь можно отнести ее крайние точки нехудшей части $M''_н$.

На рисунках 3.12–3.14 изображены наиболее характерные случаи расположения левой нижней границы в пределах интересующей нас области значений показателей качества. При этом крайние точки левой нижней границы области $M''_д$ строго допустимых систем являются нехудшими и ограничивающими. На рисунках 3.13, б и 3.14 существуют крайние и промежуточные точки на границах этой области. Это характерно тем, что граница области $M''_д$ правее точки $A_{Экл4}$ горизонтальна, а выше точки $A_{Экл1}$ вертикальна. Очевидно, возможны и промежуточные случаи (например, когда существует лишь один вариант из крайних точек, расположенных на границе области показателей качества $k_{2\min} = f(k_5)$, или существует лишь вертикальный участок границы области допустимых значений). Однако рассмотрения случаев, изображенных на рисунках 3.12–3.14, достаточно для формулировки следующих общих положений.

1. Крайняя точка A_i показывает, какое минимальное значение показателя k_1 можно получить при данной совокупности исходных данных, т. е. границе области допустимых значений $M_{дi}$ и при выполнении дополнительных требований и обеспечении показателей качества.

2. Также крайняя точка A_i соответствует системе из M_{hi} , обладающей минимальным значением показателя качества k_1 при совокупности исходных данных и требований.

3. Крайняя точка A_i может быть найдена путем решения следующих систем уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} k_1 \rightarrow \min, \\ k_2 < k_{2\max} \end{array} \right\}; \quad (3.91)$$

$$\left. \begin{array}{l} k_2 \rightarrow \min, \\ k_1 < k_{1\max} \end{array} \right\}; \quad (3.92)$$

а также при других условиях и параметрах из таблицы 3.1. При этом минимизация может быть осуществлена путем вариации параметров синтезируемой системы при заданной ее структуре или вариациями как структуры системы, так и ее параметров. Решение этой задачи может быть единственным (значения, соответствующие минимальному значению показателя k_1 , как, например, в случае, изображенном на рисунке 3.13, б).

В ряде случаев, например, в существенно различных вариантах систем энергоснабжения – электропривод и гидропривод, нахождение крайних точек путем решения условий (3.91) и (3.92) слишком сложно. При этом может оказаться целесообразным упрощение задачи (3.91) (и соответственно задачи (3.92)) заменой $k_{2\max}$ на $k_{2кр}$ – максимальное принципиально возможное (с точки зрения физической природы) значение показателя k_2 . Это означает, что при решении задачи (3.91) ограничение $k_2 < k_{2\max}$ заменяется на ограничение вида $k_2 < k_{2кр}$, что равносильно снятию ограничения на величину k_2 . Поэтому условие (3.91) принимает следующий вид:

$$k_1 = \min, \quad (3.93)$$

что означает: если решение этой задачи оказывается не единственным (в смысле значения показателя k_2), то из всех решений задачи (3.91) должно быть выбрано такое, которому соответствует наименьшее значение показателя k_2 .

На основе данных положений выделим диапазоны показателей качества для различных систем и сведем их в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели качества систем энергоснабжения и агротехнические параметры для ДМ кругового действия

| Обозначение | Ед. измерения | Предел | Тип привода | | |
|--|---------------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| | | | гидропривод | механический | электропривод |
| <i>Показатели качества</i> | | | | | |
| k_2 | кВт/га | k_{2min} | 0,15 | 0,20 | 0,06 |
| | | k_{2max} | 0,55 | 0,63 | 0,15 |
| k_3 | % | k_{3min} | 36 | 41 | 18 |
| | | k_{3max} | 67 | 83 | 38 |
| k_4 | руб./м ² | k_{4min} | 1,81 | 1,33 | 1,90 |
| | | k_{4max} | 3,99 | 3,25 | 3,83 |
| k_5 | % | k_{5min} | 8,2 | 12,1 | 6,0 |
| | | k_{5max} | 25,2 | 35,3 | 28,5 |
| k_6 | руб./год | k_{6min} | 12123 | 19284 | 5433 |
| | | k_{6max} | 42180 | 35732 | 35732 |
| k_7 | кг/га | k_{7min} | 19,68 | 40,23 | 18,93 |
| | | k_{7max} | 22,66 | 62,57 | 32,16 |
| <i>Показатели условий эксплуатации</i> | | | | | |
| z_1 | м ³ /га | z_{1min} | 100 | 100 | 100 |
| | | z_{1max} | 700 | 700 | 700 |
| z_2 | га | z_{2min} | 1,13 | 1,13 | 1,13 |
| | | z_{2max} | 358,2 | 11,21 | 358,2 |
| z_3 | тыс. руб./га | z_{3min} | 36,1 | 35,7 | 35,9 |
| | | z_{3max} | 233,9 | 245,9 | 269,4 |
| z_4 | МПа | z_{4min} | 0,25 | 0,15 | 0,15 |
| | | z_{4max} | 1,4 | 0,65 | 0,65 |
| z_5 | км | z_{5min} | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| | | z_{5max} | 40 | 40 | 40 |
| z_6 | км | z_{6min} | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| | | z_{6max} | 10 | 30 | 30 |
| z_7 | тыс. руб./год | z_{7min} | 0 | 0 | 0 |
| | | z_{7max} | 1028,0 | 33,7 | 1028,0 |

Пределные данные таблицы 3.2 определены с учетом минимаксного метода. Минимальные значения показателей качества системы принимались из условия наихудших минимальных значений существующих на практике дождеваль-ных машин кругового действия. Условия эксплуатации для каждого типа привода принимали с учетом минимального достаточного выполнения процесса объекта исследования (например, выполнение движения ДМ на гидроприводе возможно при минимальном входном давлении 0,25 МПа, так как при более низком давлении гидропривод не сможет выполнять функцию перемещения, т. е. перемещение

машины блокируется). Максимальные значения показателей определены по условию наилучших типов привода и максимальных показателей с учетом ограничений, указанных для объекта исследования, и его пространственно-временных границ (например, использование механического привода движителей опорных тележек возможно при максимальной длине трубопровода, состоящей из 3 секций длиной 60 м, так как при большей длине трубопровода перемещение крайней секции приводит к излому из-за динамических усилий на второй и третьей секциях).

Таким образом, на основе графического метода прямоугольника и свойств монотонности оптимальной поверхности решений о выборе варианта системы энергоснабжения, зная пределы изменений основных показателей качества и условий эксплуатации ДМ, можно определить границы применения каждого варианта.

Выбор оптимальной по критерию наименьшего энергопотребления системы энергоснабжения дождевальной машины на основе показателя эффективности как показателя интегрального качества k_1 сводится к определению границ применения систем в конкретных условиях эксплуатации.

Система энергоснабжения включает в себя следующие возможные системы:

ГД – гидропривод с гидродвигателем вращательного действия;

ГЦ – гидропривод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия (с гидроцилиндром);

М – механический привод;

Экл – электропривод с кабельной линией;

Эвл – электропривод с воздушной линией;

Эг – электропривод с переносным генератором;

Эакб – электропривод с аккумуляторными батареями.

При известных условиях эксплуатации дождевальной машины задача определения оптимальной системы энергоснабжения сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{aligned}
k_{1ГДi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2ГДi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4ГДi}B_1 + \Pi_P(b+k_{2ГДi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7ГДi})\tau_{\text{ч}} + k_{5ГДi}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3ГДi}B_3)} k_{\text{оргГД}}; \\
k_{1ГЦi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2ГЦi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4ГЦi}B_1 + \Pi_P(b+k_{2ГЦi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7ГЦi})\tau_{\text{ч}} + k_{5ГЦi}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3ГЦi}B_3)} k_{\text{оргГЦ}}; \\
k_{1Mi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2Mi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4Mi}B_1 + \Pi_P(b+k_{2Mi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7Mi})\tau_{\text{ч}} + k_{5Mi}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3Mi}B_3)} k_{\text{оргM}}; \\
k_{1Экли} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2Экли}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4Экли}B_1 + \Pi_P(b+k_{2Экли}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7Экли})\tau_{\text{ч}} + k_{5Экли}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3Экли}B_3)} k_{\text{оргЭкл}}; \\
k_{1Эвли} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2Эвли}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4Эвли}B_1 + \Pi_P(b+k_{2Эвли}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7Эвли})\tau_{\text{ч}} + k_{5Эвли}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3Эвли}B_3)} k_{\text{оргЭвл}}; \\
k_{1ЭГi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2ЭГi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4ЭГi}B_1 + \Pi_P(b+k_{2ЭГi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7ЭГi})\tau_{\text{ч}} + k_{5ЭГi}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3ЭГi}B_3)} k_{\text{оргЭГ}}; \\
k_{1Эакбi} &= \frac{1,1z_1z_2(b+k_{2Эакбi}z_2)\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}}(k_{4Эакбi}B_1 + \Pi_P(b+k_{2Эакбi}z_2))\frac{1,1z_1z_2}{\mu_p\pi d_{внут}}\sqrt{\frac{\rho_B}{2z_4}} + (t_{1M}z_5 + t'_{1M}z_6 + t_{1кг}k_{7Эакбi})\tau_{\text{ч}} + k_{5Эакбi}B_2(z_7(1-\rho) + 3_{\text{уд}}^{\Psi}(1-g_o))}{\mu_p\pi d_{внут}(1-k_{3Эакбi}B_3)} k_{\text{оргЭакб}}
\end{aligned}
\tag{3.94}$$

с учетом весовых коэффициентов (v_1, v_2, v_3) и коэффициента функционально-структурной эффективности $k_{орг}$.

В каждом конкретном случае для заданных условий функционирования ДМ, т. е. известных z_1-z_7 , i -й вариант из возможных систем будет иметь свое собственное значение. При этом параметры качества СЭ тесно связаны с параметрами полива, как показано в параграфе 3.1. Вывести аналитические зависимости k_1 с достаточной точностью не удастся из-за сложности расчета интегральных зависимостей. Поэтому найдем решения в виде графиков, рассчитав каждый из возможных показателей k_i в пределах заданного диапазона z_i .

Для ускорения расчетов показателя k_1 по отдельным единичным показателям в соответствии с выражениями (3.11)–(3.94) разработаны алгоритм и программа на базе Microsoft Excel поиска оптимальной системы энергоснабжения в зависимости от условий эксплуатации ДМ кругового действия и ограничений действия системы (приложение В).

На рисунке 3.15 приведено графическое решение оптимальных зон применения различных систем энергоснабжения с использованием разработанной программы.

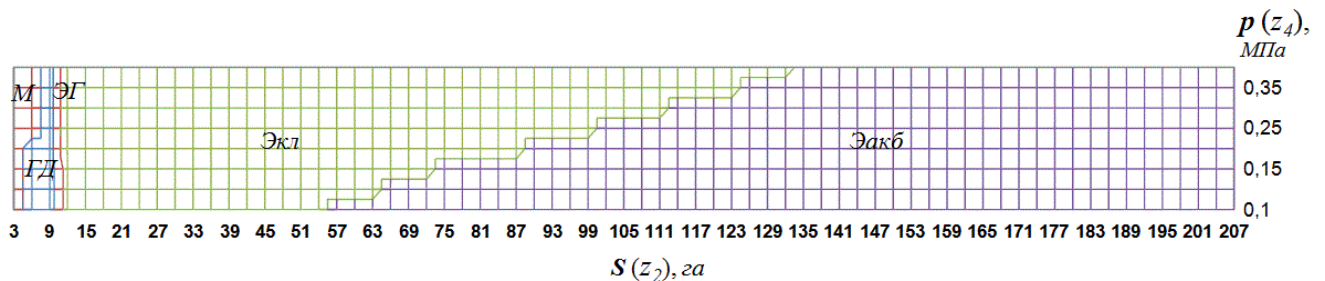


Рисунок 3.15 – Зоны оптимального применения различных систем энергоснабжения ДМ при изменении площади поливного участка и давления на входе в ДМ

Зоны оптимального применения систем получены с учетом особенностей энергетических систем: коэффициентов функционально-структурной эффективности, весовых коэффициентов значимых показателей качества, а также удельных показателей, рассчитанных по формуле (3.94). Например, при условии удаленности ДМ от централизованной энергосистемы и водоёма не более чем на 1000 м, диаметре трубопровода 159 мм, стоимости ресурса 5 руб./кВт·ч, удельной мощности 0,24 кВт/га, малой площади поливного участка $S < 3$ га и давлении на входе в ДМ 0,1...0,45 МПа оптимальным будет считаться применение механического привода.

При этих же данных при увеличении площади поливного участка $6 < S < 12$ га оптимальной становится система гидропривода с гидродвигателем вращательного действия. При большей площади ($S > 20$ га) оптимальным является электрический привод. Сначала электропривод с питанием от кабельной линии, затем плавно, при изменении давления на входе в ДМ, наилучшей становится система энергоснабжения на электроприводе с питанием от аккумуляторных батарей.

Однако при незначительном изменении хотя бы одного из параметров зоны оптимальных систем резко изменяются. Например, при изменении только диаметра водопроводящего трубопровода $d = 219$ мм графическое представление эффективных зон (см. рисунок 3.15) имеет другой вид (рисунок 3.16).

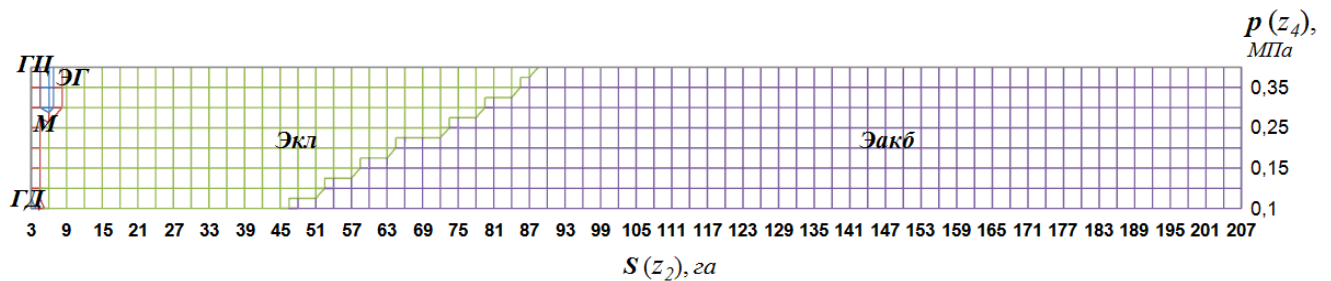


Рисунок 3.16 – Зоны применения оптимальных систем энергоснабжения ДМ при изменении площади поливного участка и давления на входе в ДМ

Из рисунка 3.16 видно, что появилась зона оптимальной системы гидропривода с гидродвигателем возвратно-поступательного действия, а зона гидропривода с гидродвигателем сдвинулась в сторону меньшей площади поливного участка ($S < 3$ га). Также расширилась зона использования электропривода с питанием от аккумуляторных батарей.

Рассмотрим более подробно расположения зон оптимальных систем энергоснабжения на рисунках 3.17–3.22, используя нелинейную шкалу представления.

При изменении параметров площади поливного участка $S(z_2)$ и входного давления $p(z_4)$ в ДМ на рисунке 3.17 расположились зоны всех рассматриваемых вариантов: М – механический привод; ГЦ – гидропривод с гидроцилиндром; ГД – гидропривод с гидродвигателем вращательного действия; Эвл – электропривод с питанием от воздушной линии; Экл – электропривод с питанием от кабельной линии; ЭГ – электропривод с переносным генератором; Эакб – электропривод с питанием от аккумуляторных батарей (см. рисунки 3.17–3.18).

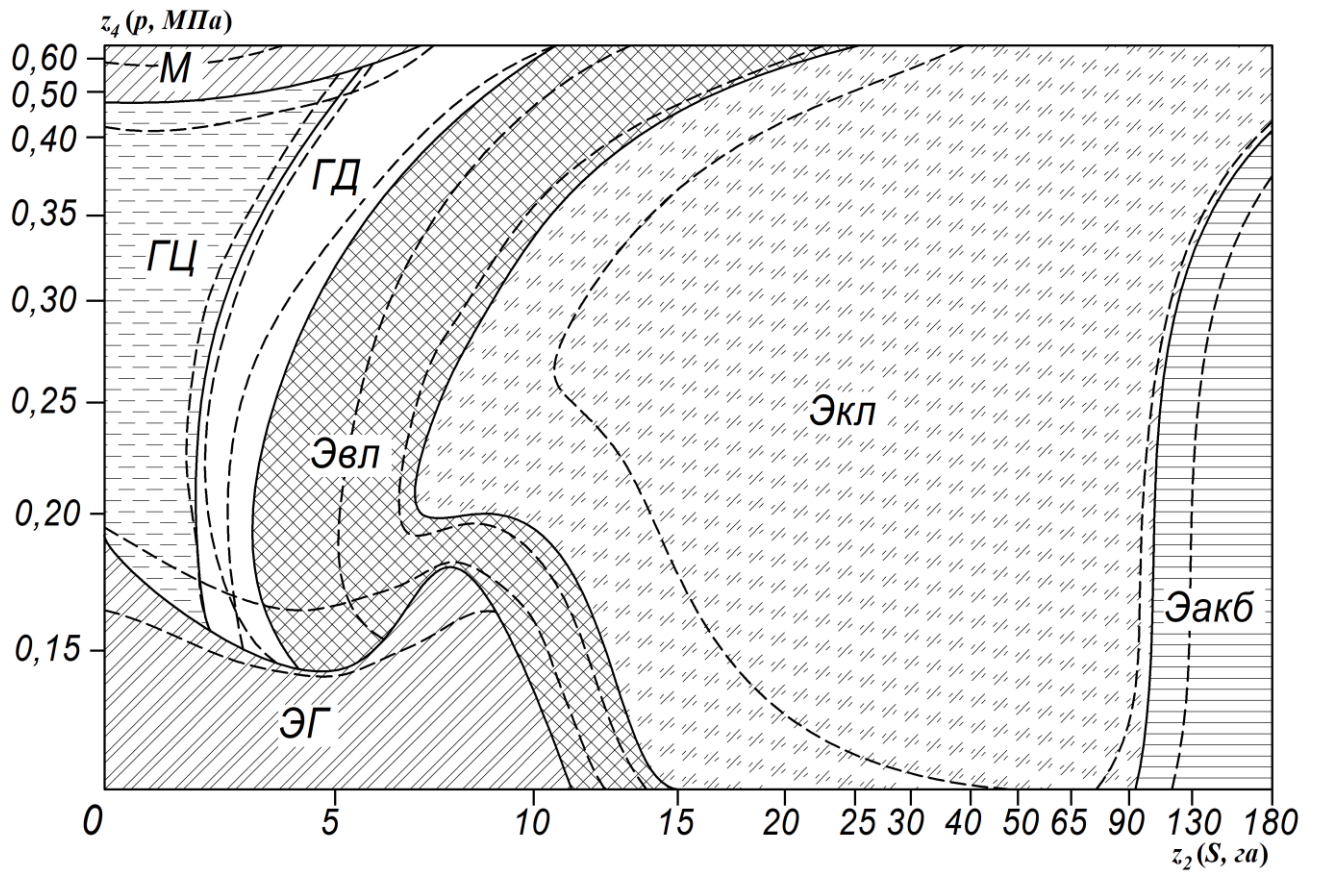


Рисунок 3.17 – Зоны применения оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии: $d = 219$ мм; $l_{\text{нп}} = 1000$ м; $l_{\text{в}} = 1000$ м; $m_{\text{пн}} = 500$ м³/га; $\Delta\Pi = 20$ тыс. руб.

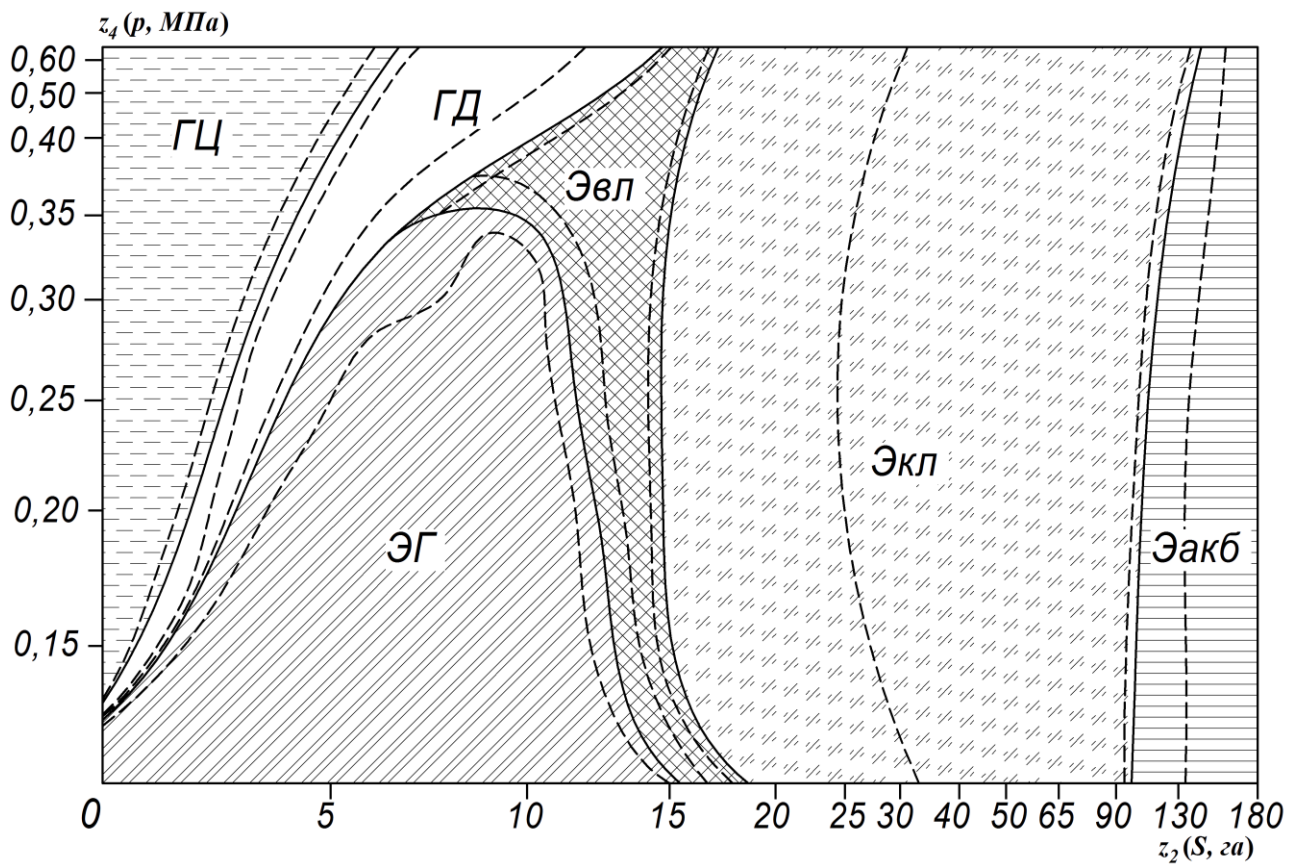


Рисунок 3.18 – Зоны применения оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии: $d = 193,7$ мм; $l_{\text{нп}} = 1000$ м; $l_{\text{в}} = 1000$ м; $m_{\text{пн}} = 500$ м³/га; $\Delta\Pi = 200$ тыс. руб.

ДМ с трубопроводом диаметром $d = 219$ мм при удаленности поливного участка от централизованной энергосистемы и водоема $l_{\text{нп}} = l_{\text{в}} = 1000$ м с поливной нормой $m_{\text{пн}} = 500$ м³/га и максимальной прибылью от полива 20 тыс. руб. при площади поливного участка $S = 10$ га и при высоком входном давлении $p > 0,6$ МПа должна быть укомплектована системой гидропривода с гидродвигателем вращательного действия, так как при этих данных критерий эффективности имеет наименьшее значение.

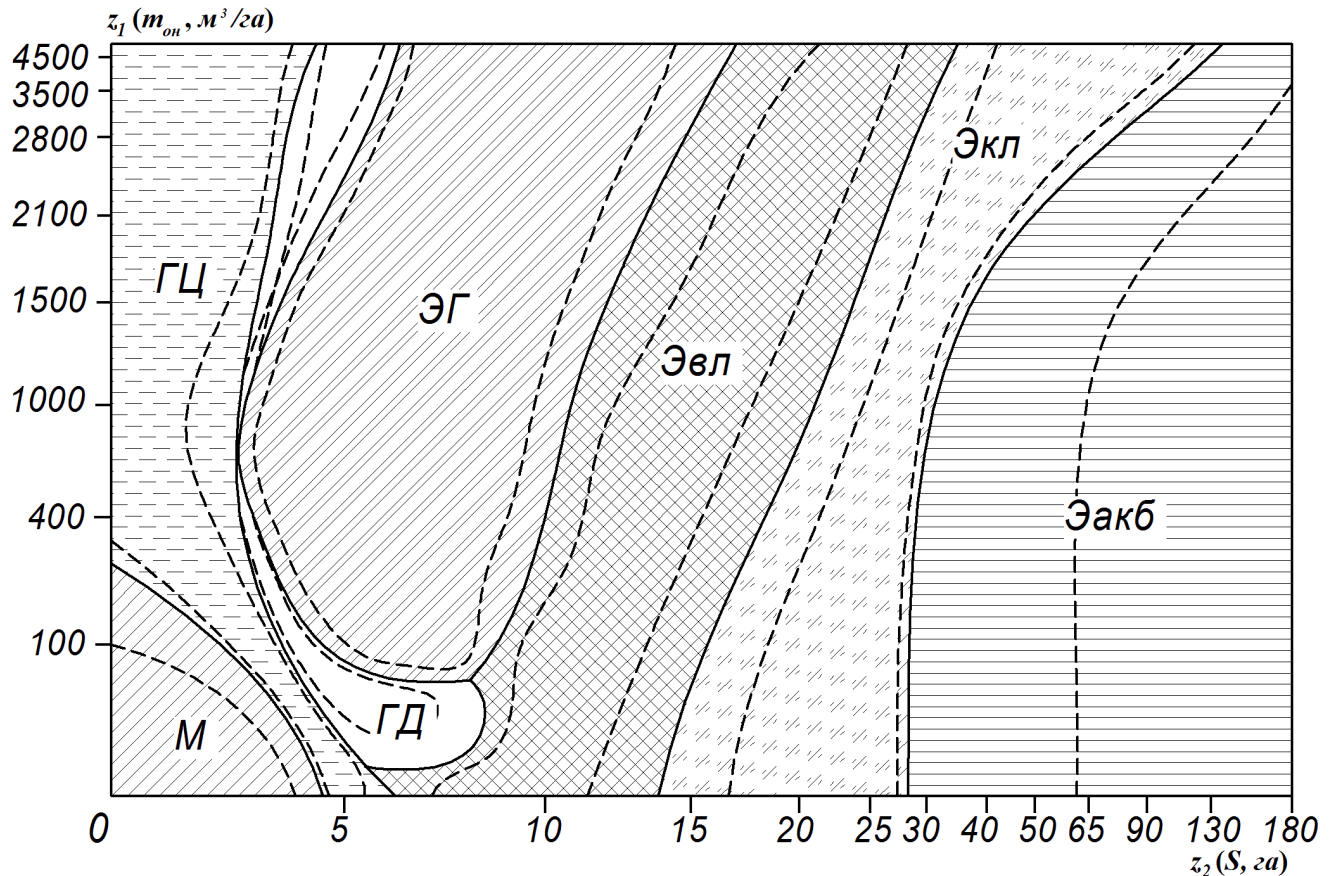


Рисунок 3.19 – Зоны применения оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии: $d = 159$ мм; $l_{\text{нп}} = 1000$ м; $l_{\text{в}} = 1000$ м; $p = 0,25$ МПа; $\Delta\Pi = 200$ тыс. руб.

Если же при тех же исходных данных и давлении $p > 0,6$ МПа площадь поливного участка $S > 50$ га, то оптимальной системой энергоснабжения становится электропривод с питанием от кабельной линии. Однако при тех же исходных данных и $S = 10$ га с входным давлением $p < 0,15$ МПа оптимальной будет система электропривода с питанием от переносного генератора. Это обусловлено совокупностью влияющих на каждую систему показателей качества (надежности, стоимости, цены на ресурс и т. п.). Видно, что при этих исходных данных большая зона оптимальности принадлежит системам электропривода с питанием от кабельной линии и от ак-

кумуляторных батарей. Это связано в первую очередь со сравнительно низкими показателями мощности k_2 и высоким коэффициентом функционально-структурной эффективности данных систем.

Если же ДМ будет иметь трубопровод диаметром $d = 193,7$ мм, а прирост урожая от полива будет оцениваться в 200 тыс. руб. ($l_{\text{нп}} = l_{\text{в}} = 1000$ м; $m_{\text{пн}} = 500$ м³/га) (см. рисунок 3.18), то зоны применения гидропривода расширяются, а также расширяется зона ЭГ. Однако они применимы на малых поливных площадях ($S < 20$ га). Для больших поливных площадей оптимальными также являются Экл и Эакб. Пунктирными линиями на рисунках 3.17–3.22 указаны смежные части пересечения зон оптимальности в пределах статистической ошибки расчетов значений показателя эффективности k_1 .

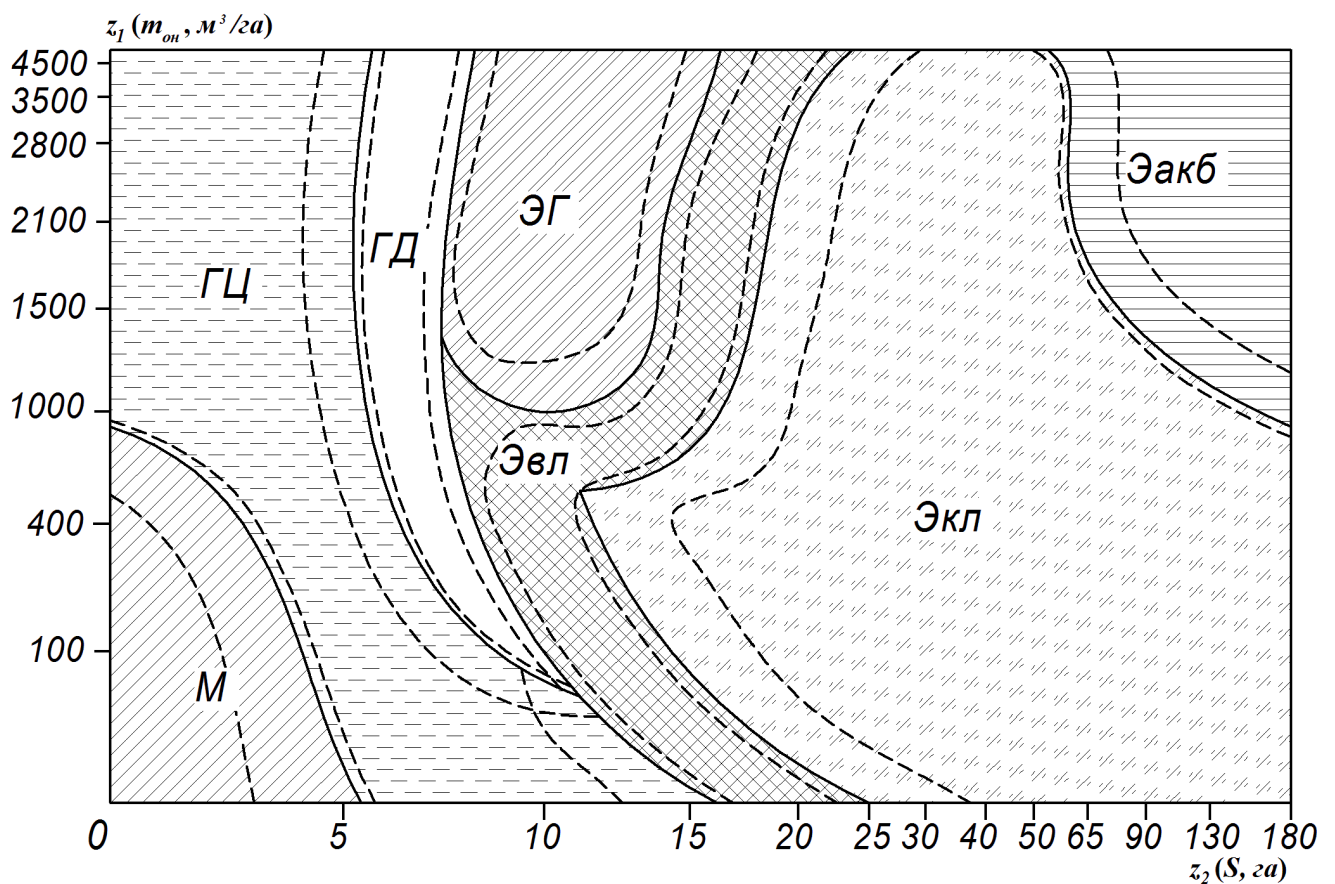


Рисунок 3.20 – Зоны применения оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии: $d = 219$ мм; $l_{\text{нп}} = 1000$ м; $l_{\text{в}} = 1000$ м; $p = 0,45$ МПа; $\Delta\Pi = 20$ тыс. руб.

Зависимость показателя k_1 при условиях эксплуатации ДМ с изменением площади поливного участка и нормы полива z_1 ($m_{\text{пн}}$, м³/га) будет другая. Зоны применения оптимальных систем также изменятся.

На рисунках 3.19–3.20 видно, что при малых оросительных (поливных) нормах и площади полива ($m_{\text{он}} < 350$ м³/га; $S < 5$ га) оптимальной будет система

энергоснабжения с механическим приводом, причем с увеличением диаметра (с 159 до 219 мм) и давления на входе в ДМ (с 0,25 до 0,45 МПа) ее зона расширяется. Но ее смежная зона достаточно широка и с учетом ошибок может расширить зону применения гидропривода (см. рисунок 3.20). Большую часть также занимает зона системы Экл.

Удаленность ДМ от централизованной энергосистемы и от водоема, откуда осуществляется подача поливной воды, также влияет на выбор системы (см. рисунки 3.21–3.22). Если рассматривать поливной участок площадью 40 га с давлением на входе в ДМ 0,45 МПа, то при удаленности водоема $l_b < 1,5$ км оптимальной является система с гидроприводом возвратно-поступательного действия с гидроцилиндром и вращательного действия при удаленности от централизованной энергосистемы $l_{\text{нп}} > 700$ м, как показано на рисунке 3.21. Если же ДМ находится к централизованной энергосистеме ближе 700 м, то оптимальной становится система с электроприводом, питаемая кабельной или воздушной линией.

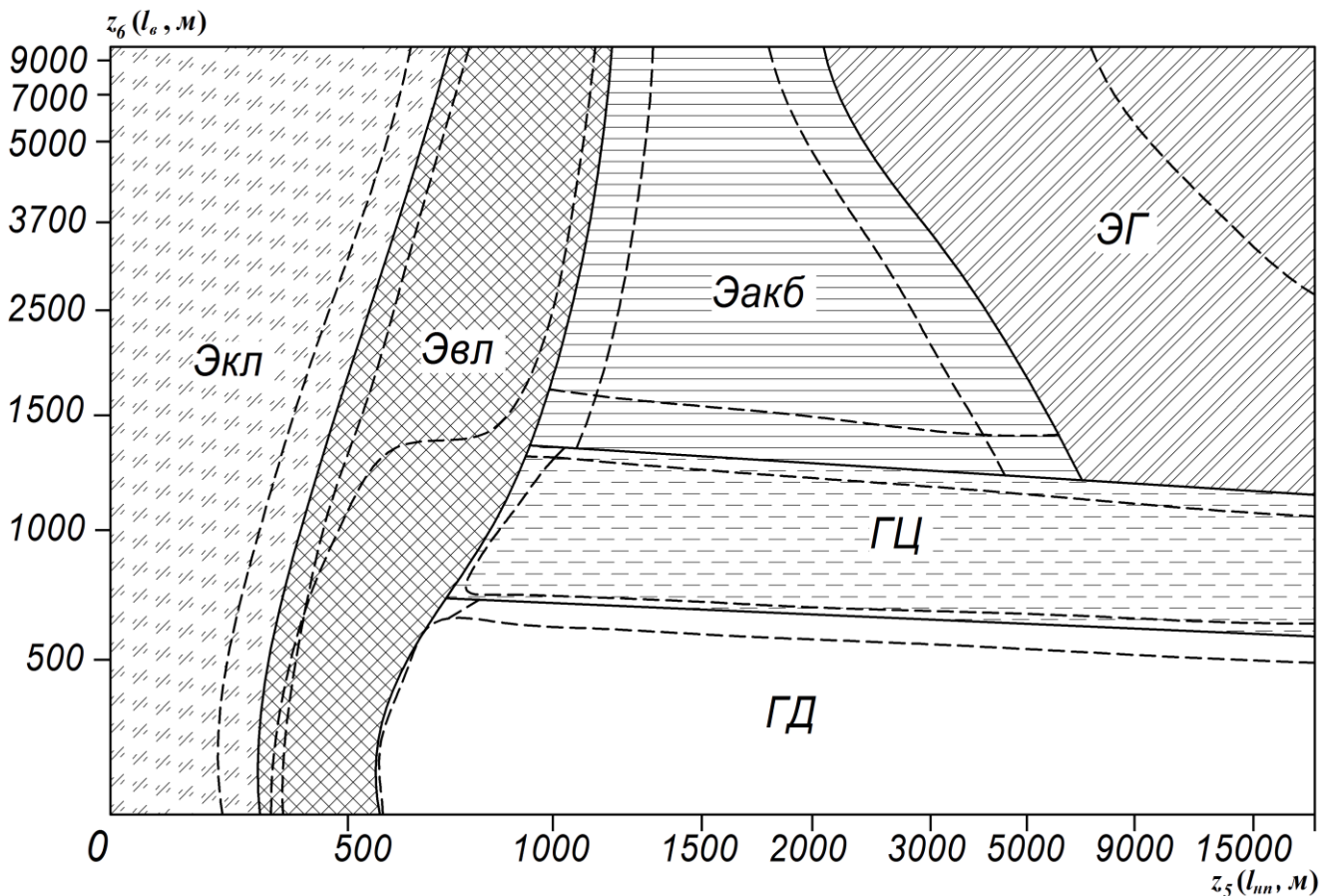


Рисунок 3.21 – Зоны применения оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии: $d = 219$ мм; $S = 40$ га; $m_{\text{нп}} = 500 \text{ м}^3/\text{га}$; $p = 0,45$ МПа; $\Delta\Pi = 20$ тыс. руб.

Если же ДМ удалена от водоема и централизованной энергосистемы более чем на 1,5 км, то оптимальной будет система Эакб или ЭГ с возможностью замены второй на Эакб из-за широкой смежной части [31].

Однако при площади поливного участка $S > 100$ га оптимальной будет только система с электроприводом, которая при удаленности от централизованной энергосистемы $l_{\text{нп}} < 500$ м должна быть с питанием от кабельной линии, при $l_{\text{нп}} < 1000$ м – от воздушной линии, при $l_{\text{нп}} > 1000$ м – от аккумуляторной батареи (см. рисунок 3.22).

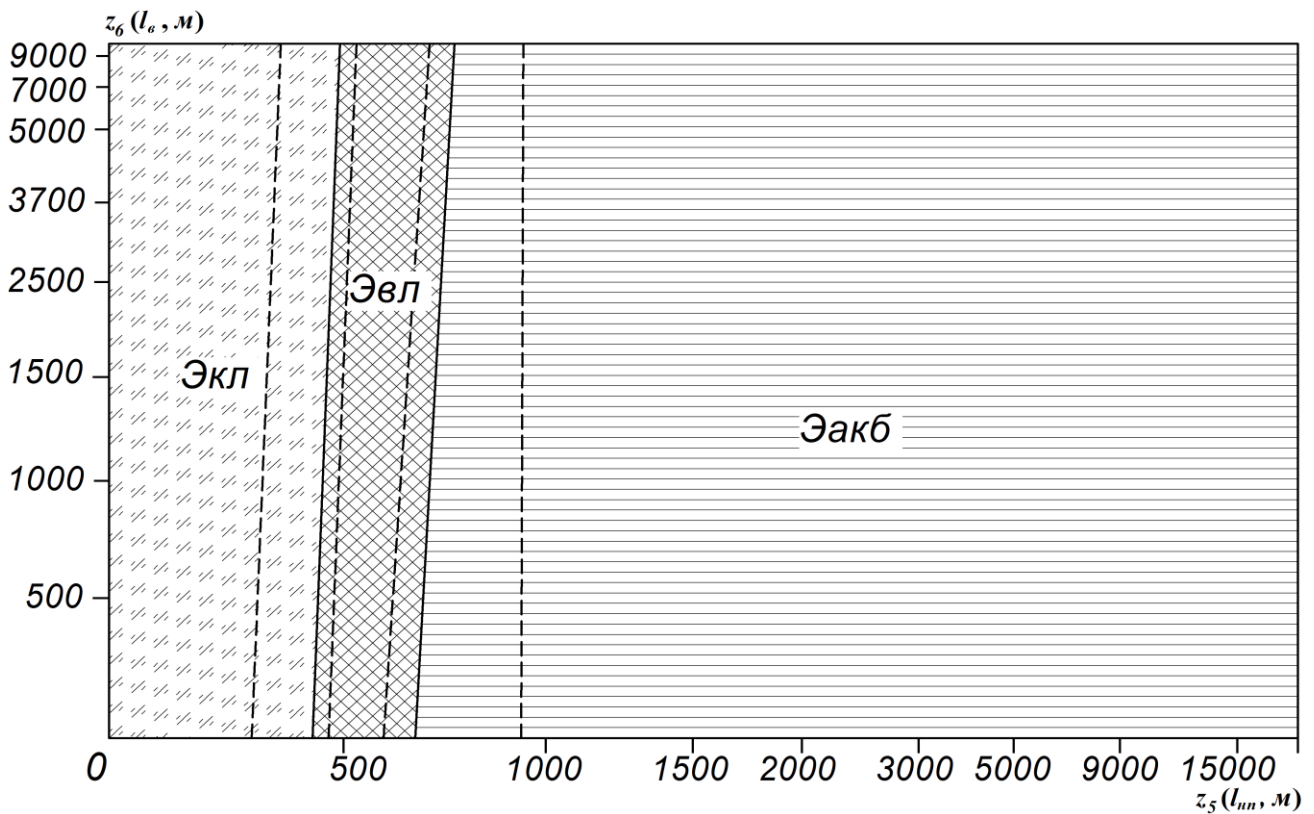


Рисунок 3.22 – Зоны применения оптимальных вариантов систем энергоснабжения ДМ при условии: $d = 219$ мм; $S = 100$ га; $m_{\text{нп}} = 500$ м³/га; $p = 0,65$ МПа; $\Delta\Pi = 200$ тыс. руб.

Таким образом, анализ полученных в совокупности графических решений применения оптимальных систем энергоснабжения дождевальная машины показал, что на выбор влияет ряд мелиоративных и технико-экономических показателей. Например, диаметр трубопровода и давление на входе в машину определяют продолжительность потребления мощности, прирост прибыли от полива – составляющую показателя надежности и, соответственно, эксплуатационную ответственность оборудования того или иного типа привода. От типа привода зависит удельная составляющая мощности, а потребляемая энергия – от поливной и оросительной нормы, которая определяется культурой и погодными условиями, площадью

полива и потерями. При этом для некоторых систем нет потерь, которые зависят от удаленности ДМ от водоема и централизованной сети энергоснабжения, так как источник энергии находится рядом с машиной (для систем с механическим приводом, электропривода с питанием от переносного генератора и аккумуляторных батарей). Величина эксплуатационных затрат зависит от цены на ресурс, который определяется типом привода: для гидропривода ресурсом является электроэнергия, потребляемая нагнетательным насосом насосной станции; для механического привода и переносного генератора – жидкое топливо (горюче-смазочные материалы); для электропривода – электроэнергия, потребляемая электродвигателем от переносного генератора, централизованной энергосистемы или АКБ. Вместе с этими данными на выбор влияет функционально-структурная эффективность рассматриваемых систем.

В результате исследований получены данные оптимального применения различных типов привода для дождевальных машин:

- гидравлический привод – при площади поливного участка $S < 40$ га, с входным давлением в трубопроводе $p > 0,35$ МПа и при удаленности от водоема $l_{\text{в}} < 1000$ м;
- механический привод – при площади поливного участка $S < 6$ га, с входным давлением в трубопроводе $p < 0,30$ МПа, при удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} > 10000$ м и водоёма $l_{\text{в}} > 10000$ м;
- электрический привод – при площади поливного участка $S > 40$ га, удаленности от водоёма $l_{\text{в}} > 1000$ м; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} < 1000$ м предпочтительнее кабельная или воздушная линия; при $l_{\text{нп}} > 1000$ м и стоимости ресурса $c_{\text{р}} < 7,5$ руб./кВт·ч рекомендуется аккумуляторное питание, а питание от переносного генератора – при $l_{\text{нп}} > 1000$ м и $c_{\text{р}} > 7,5$ руб./кВт·ч.

3.4 Выводы по главе

1. Обоснованы параметры выбора системы энергоснабжения, подлежащие оптимизации: удельная мощность P' , показатель потерь энергии η' , стоимость системы C , надежность $Q_0(t)$, эксплуатационные затраты z и масса элементов системы $m_{\text{СЭ}}$, зависящие от поливной (оросительной) нормы $m_{\text{пн}}$ ($m_{\text{он}}$), площади поливного участка S , давления потока жидкости на входе в ДМ p , удаленности по-

ливного участка от централизованной энергосистемы $l_{\text{нп}}$ и водоема $l_{\text{в}}$, прироста прибыли от полива $\Delta\Pi$, цены на энергоресурс $c_{\text{р}}$, диаметра водораспределительного трубопровода DM $d_{\text{внут}}$, плотности поливной воды $\rho_{\text{в}}$, коэффициента расхода $\mu_{\text{р}}$, постоянной величины мощности b , трудоемкости ТОР линии водопровода $t_{1\text{м}}$, трудоемкости ТОР энергоснабжения $t_{1\text{м}}$, трудоемкости ТОР оборудования $t_{1\text{кг}}$, часовой тарифной ставки обслуживающего персонала $\tau_{\text{ч}}$, показателя профилактических мероприятий $g_{\text{о}}$, удельных затрат на профилактические мероприятия $З_{\text{уд}}$, относительного показателя фактической прибыли ρ .

2. Получен обобщающий критерий $V_{\text{кр-о}}$ эффективности системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия, который зависит от технических, мелиоративных, конструктивных и экономических показателей.

3. Получена математическая модель выбора энергоснабжения дождевальных машин кругового действия, позволяющая проводить дискретную оптимизацию и получить условия применения оптимальных систем энергоснабжения с минимальным значением обобщающего критерия:

- гидравлический привод – при площади поливного участка $S < 40$ га, с входным давлением в трубопроводе $p > 0,35$ МПа и при удаленности от водоема $l_{\text{в}} < 1000$ м;

- механический привод – при площади поливного участка $S < 6$ га, с входным давлением в трубопроводе $p < 0,30$ МПа, при удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} > 10000$ м и водоёма $l_{\text{в}} > 10000$ м;

- электрический привод – при площади поливного участка $S > 40$ га, удаленности от водоёма $l_{\text{в}} > 1000$ м; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} < 1000$ м предпочтительнее кабельная или воздушная линия; при $l_{\text{нп}} > 1000$ м и стоимости ресурса $c_{\text{р}} < 7,5$ руб./кВт·ч рекомендуется аккумуляторное питание, а питание от переносного генератора – при $l_{\text{нп}} > 1000$ м и $c_{\text{р}} > 7,5$ руб./кВт·ч.

4. На основе полученных решений математической модели и обобщающего показателя эффективности энергоснабжения установлено, что большую зону применения занимают системы с электроприводом, нагрузка на который определяется техническими показателями «А» со степенью проявления $x = 1,1-2,0$, а также на отдаленных участках $l_{\text{нп}} > 1000$ м с аккумуляторным источником питания.

4 СПОСОБЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1 Обоснование параметров электропривода опорных тележек секций электрифицированной дождевальной машины кругового действия

Снизить энергопотребление полива дождевальными машинами помимо выбора оптимальной системы энергоснабжения возможно путем разработки и применения различных технических решений. К ним относятся все воздействия, которые способствуют снижению потребления энергии.

В электрифицированных дождевальных машинах основным потребителем энергии является электропривод опорных тележек, движители которых – чаще всего колеса. Способы снижения энергопотребления электроприводов ориентированы на уменьшение механической нагрузки, оптимизацию режимов работы привода, применение новых устройств и схем в системах управления и защиты электропривода.

Примем к исследованию параметр мощности системы энергоснабжения k_2 – удельную мощность P' (кВт/га). Рассмотрим основные параметры электроприемника, т. е. параметры машины, которые определяют нагрузку электропривода, а также оценим зависимость ее снижения при изменении параметров трубопровода и колес опорных тележек. ДМ могут быть укомплектованы трубопроводом с различным наружным диаметром (114,0 мм; 127,0; 133,0; 140,0; 152,0; 159,0; 168,0; 177,8; 193,7; 21,0 мм) и с различной толщиной стенки.

В качестве движителей опорных тележек ДМ используют колеса с пневматическими шинами, жесткие, полужесткие, а также пластиковые колеса [2, 104, 105, 137, 145, 147–152, 162, 178, 180, 231, 240, 271, 289, 294, 309, 323]. При этом опорная подвижная тележка может быть устроена на 2, 3 и на 4 колесах. Она также может быть выполнена на гусеничном ходу, на полугусеничном, с двумя независимыми гусеницами, с ломающейся рамой и т. п. [147, 148, 150–152] вместо колес. Электродвигатель может быть как переменного, так и постоянного тока с

различными характеристиками, а электропривод – индивидуальным или групповым. В состав электропривода входит редуктор, вид и характеристики которого оказывают влияние на потребляемую мощность. Поэтому оценка влияния типа двигателей на энергопотребление позволит определить оптимальное исполнение ходовой части ДМ.

Вместе с этим необходимо оценить энергопотребление элементов системы управления и защиты электропривода, разработать способы и средства с меньшим потреблением электроэнергии, формирующие значение показателя мощности системы k_2 , а также рассмотреть применение альтернативных возобновляемых источников энергии как одного из современных способов повышения энергетической эффективности.

Опираясь на предпосылки движения по окружности [147–152, 231, 345], большинство ДМ имеют автоматическую систему дискретного движения в повторно-кратковременном («старт-стоповом») режиме посекционно, а некоторые машины [105] имеют автоматическое управление перемещения целиком, т. е. все секции движутся одновременно, единым лучом.

Рассмотрим движение всех секций дождевальная машины одновременно, единым лучом как идеальный случай. Для обоснования параметров электропривода проанализируем рабочий процесс такого режима движения (рисунок 4.1).

Особенность кругового движения заключается в равномерном передвижении всех секций одновременно, так называемым единым лучом. В таком случае каждая опорная тележка должна двигаться с индивидуальной линейной скоростью v_{Ti} (м/с). Первая тележка преодолевает путь s_{T1} (м) за промежуток времени t (с), вторая тележка за такое же время должна преодолеть путь в два раза больший:

$$s_{T2} = s_{T1} + s_{T1} = 2s_{T1}. \quad (4.1)$$

Следующая опорная тележка за тот же промежуток времени проходит путь в 3 раза больший, чем первая, и т. д.

Тогда с учетом этого скорость n -й опорной тележки:

$$v_{Tn} = nv_{T1}. \quad (4.2)$$

Линейная скорость движения первой и последующих тележек определяется геометрическими параметрами двигателей. Рассмотрим ДМ, у которой двигатели

лями являются колеса с пневматическими шинами. Частота вращения колес связана с линейной скоростью через радиус. Тогда из условия равного радиуса колес тележек их угловая скорость $\omega_{кTi}$ (рад/с) будет отличаться в той же зависимости, что и линейная скорость движения тележек:

$$\omega_{кTi} = n\omega_{кT1} = \frac{nv_{T1}}{r}, \quad (4.3)$$

где n – номер секции, начиная от неподвижной опоры; $\omega_{кT1}$ – угловая скорость колес 1-й тележки, рад/с; r – радиус колес тележки, м.

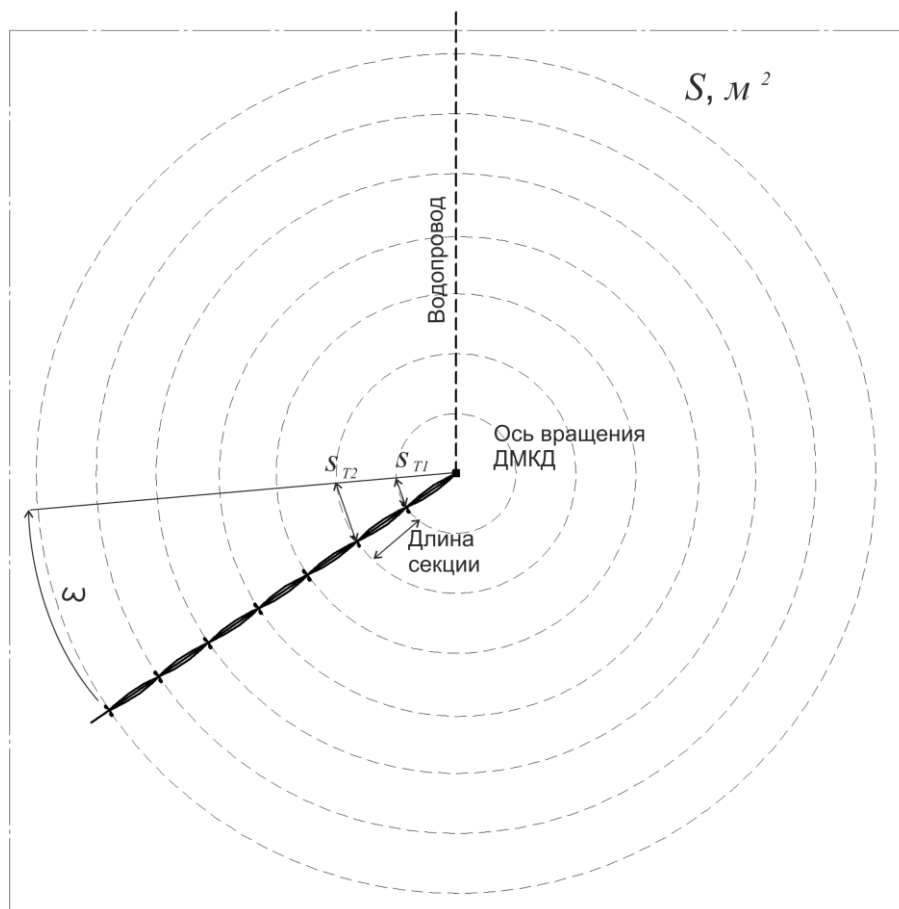


Рисунок 4.1 – Дождевальная машина кругового действия, состоящая из 7 секций с площадью орошения S (ω – угловая частота движения ДМ)

Принимая во внимание параметры движения тележек, рассмотрим механическую характеристику рабочей машины [345, 349, 92–94, 156, 203, 205, 315]. Для этого примем допущение, что суммарный вес ДМ равномерно распределен на колеса тележек, а момент сопротивления качению M_C отдельной тележки зависит от ее веса.

Согласно теории электропривода [203, 205, 315], момент сопротивления качению зависит от суммы моментов трогания, номинального момента сопротивления качению $M_{C.ном}$, а также от показателя степени, зависящего от характера нагрузки. Момент трогания оказывает влияние в начальный момент времени продолжительностью 1–3 с. Под нагрузкой момент трогания составляет $(0,5 \dots 1,1)M_{C.ном}$. Показатель степени определяется характером нагрузки в зависимости от изменения момента сопротивления от изменения угловой скорости [203, 205, 315]. Для того, чтобы определить группу электропривода, необходимо рассмотреть силовую схему опорной тележки ДМ (рисунок 4.2).

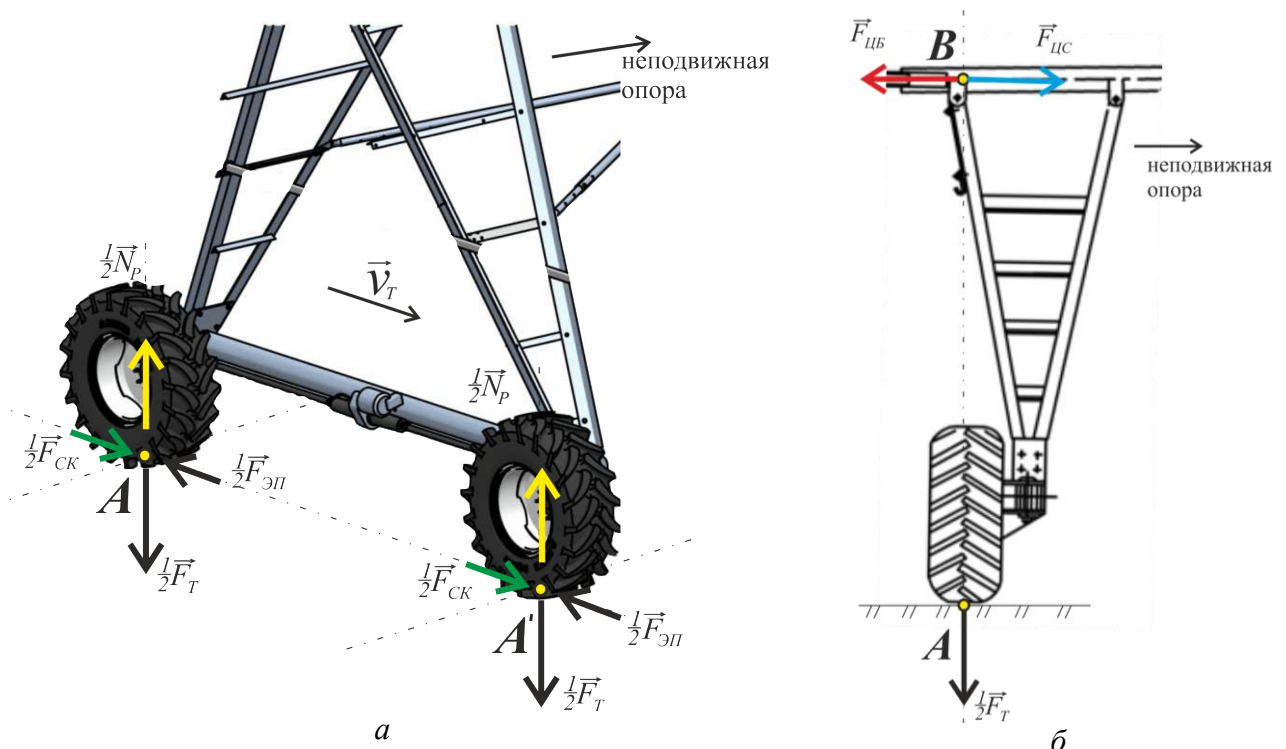


Рисунок 4.2 – Упрощенная силовая схема опорной тележки дождевальная машины кругового действия: *a* – действие сил механической нагрузки электропривода; *б* – действие центробежной и центростремительной сил

Силы распределены равномерно и действуют на две точки A и A' опоры в месте контакта колес с поверхностью грунта. Силу сопротивления качению $\vec{F}_{СК}$, которая определяет величину момента и силы $\vec{F}_{Эп}$, рассчитывают через коэффициент сцепления колес с грунтом μ и величину силы реакции опоры \vec{N}_p , которая действует в точке действия силы тяжести \vec{F}_T .

Анализ схем на рисунке 4.2 показывает, что при высокой угловой скорости колес $\omega_{кTi}$ увеличивается угловая скорость движения секции целиком ω_i , что при-

водит к возникновению в точке B (см. рисунок 4.2, б) центробежной силы $\vec{F}_{цб}$ и ее уравновешивающей центростремительной силы $\vec{F}_{цс}$. Соответственно точка действия силы реакции опоры пропорционально увеличению угловой скорости секции ω_i перераспределяется на неподвижную опору (так называемую ось вращения) и начинает действовать в горизонтальной плоскости, как и сила тяжести. Это явление возникает в неинерциальных системах отсчета, его еще называют переходным процессом инерциальной системы в неинерциальную [96, 280, 302]. Тогда связь угловых скоростей колес опорной тележки и секции целиком отражается на нагрузочной характеристике электропривода. При высокой угловой скорости колес происходят перераспределение сил и снижение силы сопротивления качению и, соответственно, уменьшение момента сопротивления качению. В общем случае зависимость момента от угловой скорости секции будет иметь вид, представленный на рисунке 4.3.

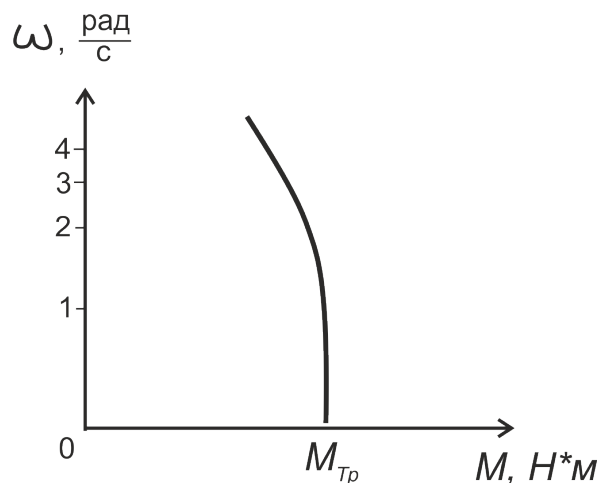


Рисунок 4.3 – Механическая характеристика электропривода опорной тележки секции ДМ

Однако в реальных условиях величина угловой скорости секции дождеваль-ной машины $\omega_i \ll 1$ рад/с, поэтому центробежной силой можно пренеб-речь (центробежное ускорения $10^{-4} \dots 10^{-6}$ м/с² при угловой скорости колес $\omega_k = 0,0023$ рад/с). Тогда в реальном случае момент сопротивления качению ко-лес:

$$M_C = M_{C,ном}(1 + \mu_{трог}), \quad (4.4)$$

где $\mu_{трог}$ – коэффициент, учитывающий момент трогания, $\mu_{трог} = 0,5 \dots 1,0$.

Момент сопротивления [315]:

$$M_C = F_{CK} r, \quad (4.5)$$

где F_{CK} – сила сопротивления качению, Н; r – радиус колеса (плечо действия силы), м.

$$F_{CK} = \mu N_P = \mu F_T = \mu m_{PT} g, \quad (4.6)$$

где μ – коэффициент сцепления колес с грунтом; m_{PT} – рабочая масса секции (масса секции с поливной водой в рабочем режиме), кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

Согласно [203, 205, 315], параметры электропривода опорной тележки можно определить с учетом приведения моментов рабочей машины и электродвигателя через передачу по формуле:

$$M_{дв} \omega_{дв} = \frac{M_C \omega_{кГ1}}{\eta_{пер}}, \quad (4.7)$$

где $M_{дв}$ – момент, создаваемый электродвигателем, Н·м; $\omega_{дв}$ – угловая скорость электродвигателя (из паспортных данных), рад/с; $\eta_{пер}$ – КПД передачи.

Потребителем энергии является электродвигатель. Его мощность на валу $P_{дв}$ (Вт) для первой опорной тележки можно рассчитать через угловую скорость вращения колес $\omega_{кГ1}$ [32]:

$$P_{двГ1} = \frac{M_{дв} \omega_{дв}}{\eta_{дв}} = \frac{M_C \omega_{кГ1}}{\eta_{дв} \eta_{пер}}, \quad (4.8)$$

где $\eta_{дв}$ – КПД электродвигателя.

Тогда для n -й тележки мощность на валу электродвигателя (для идеального случая при движении единым лучом):

$$P_{двГn} = \frac{M_C n \omega_{кГ1}}{\eta_{дв} \eta_{пер}} = n P_{двГ1}. \quad (4.9)$$

Таким образом, минимальная мощность на валу, необходимая для привода колес ДМ, приходится на первую тележку. Тогда с учетом выражения (4.5) мощность на валу электродвигателя выразим через радиус колеса:

$$P_{двГ1} = \frac{F_{CK} r \omega_{кГ1}}{\eta_{дв} \eta_{пер}} = \frac{F_{CK} r \omega_{дв1}}{i_1 \eta_{дв} \eta_{пер}}, \quad (4.10)$$

i_1 – передаточное число редуктора.

В результате мощность на валу электродвигателя в составе электропривода колес опорной тележки зависит от n -й секции дождевальной машины, причем наименьшее значение мощности приходится на первую тележку, так как для прохождения пути $s_{Т1}$ требуется наименьшая угловая скорость (в идеальном случае движения по кругу единым лучом). Из выражения (4.6) видно, что мощность на валу также зависит от рабочей массы секции, радиуса колес, передаточного числа редуктора, преобразующего частоту вращения электродвигателя в частоту вращения колес, а также от КПД двигателя и передачи. Например, для первой секции при коэффициенте сцепления $\mu = 0,8$ колес радиусом $r = 0,6$ м с рабочей массой $m_{рТ} = 2500$ кг и с общим передаточным числом редуктора $i_1 = 2000$, $\eta_{пер} = 0,73$ расчетная мощность на валу P_p электродвигателя с частотой вращения $\omega = 1750 \text{ мин}^{-1}$ ($29,17 \text{ с}^{-1}$) и $\eta_{дв} = 0,94$ равна 250 Вт.

4.2 Оценка изменения энергопотребления электропривода за счет изменения конструктивных параметров дождевальной машины

Электродвигатель преобразует электрическую энергию в механическую энергию вращательного движения. Из выражения мощности (4.10) видно, что передаточное число определяет соотношение скоростей вращения колес и электродвигателя. Тогда увеличение передаточного числа при прочих равных параметрах ведет к снижению мощности на валу электродвигателя, но уменьшает угловую скорость колес опорной тележки $\omega_{кТ1}$ и секции ω_1 . Угловая скорость электродвигателя обусловлена конструктивными особенностями магнитной системы и типоразмером двигателя по данным завода-изготовителя [140, 153, 207, 264–266]. Регулирование угловой скорости и момента на валу может быть достигнуто путем использования редуктора в конструкции электродвигателя. Исполнение электродвигателей в единой конструкции с редуктором (так называемые мотор-редукторы) широко применяют для привода ДМ [147–152].

Сила сцепления и радиус колес определяют динамические свойства электропривода. Воздействуя на значение силы сопротивления качению, можно сни-

зять нагрузку электропривода и, соответственно, сократить потребление энергии. Уменьшить силу сопротивления качению в соответствии с выражением (4.6) можно путем снижения веса P_B или рабочей массы m_{PT} .

Сила сопротивления качению в точке касания колес с грунтом зависит от коэффициента сцепления μ и результирующего веса P_B в данной точке:

$$F_{СК} = \mu P_B. \quad (4.11)$$

Коэффициент сцепления зависит от параметров колес: материала, протектора, ширины колеса, а также от параметров грунта (вида, структуры, влажности и т. п.). Принимая в данном рассмотрении стандартные размеры колес и работу машины на сухом грунте, можно считать коэффициент сцепления постоянным и наибольшим. Тогда результирующий вес в точке действия:

$$P_B = P_{BT} + P_{BB} + P_{BO}, \quad (4.12)$$

где P_{BT} – вес трубопровода без воды вместе с фермой, Н; P_{BB} – вес поливной воды, Н; P_{BO} – вес опоры секции, Н.

Вес опоры определяется ее конструктивными особенностями. Опора представляет собой А-образную раму, на вершине которой закреплена крайняя часть водораспределительного трубопровода с шарниром карданного типа. Основная функция опоры – удерживать водораспределительный трубопровод с возможностью перемещения по кругу (рисунок 4.4). Тогда, снижая какой-либо вес из выражения (4.12), можно пропорционально снизить нагрузку электропривода.

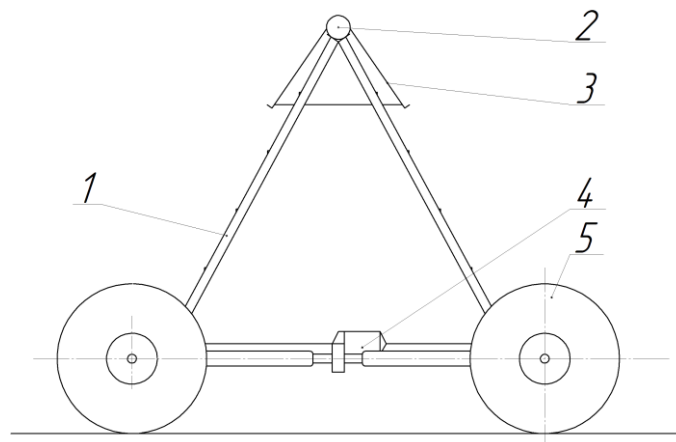


Рисунок 4.4 – Опора секции дождевальной машины (вид сбоку): 1 – А-образная рама; 2 – водораспределительный трубопровод; 3 – шпренгельная ферма трубопровода; 4 – электропривод; 5 – колеса

Вес опоры складывается из веса А-образной рамы, веса элементов электропривода, крепежа и веса колес. Изменяя (упрощая) конструкцию опоры, необходимо проводить продолжительные и сложные экспериментальные исследования, чтобы не вызвать ряд негативных последствий в нарушении устойчивости, динамических характеристик и т. д. Поэтому в данном расчете примем P_O постоянным.

Вес сухого водораспределительного трубопровода:

$$P_{вГ} = \gamma_T V_{матГ} (1 + \alpha), \quad (4.13)$$

где γ_T – удельный вес трубопровода, который зависит от материала, Н/м³; $V_{матГ}$ – объем материала трубопровода, который зависит от диаметра, толщины стенки и длины, м³; α_ϕ – коэффициент, учитывающий вес фермы, поддерживающей трубопровод, $\alpha_\phi = 0,05 \dots 0,10$ [105, 188, 262].

Обычно водораспределительный трубопровод выполнен в виде соединенных отрезков стальной трубы с толщиной стенки $b_{ст}$. Соединения и фермы изготовлены так, что удовлетворяют требованиям, предъявляемым к механической прочности, исключая излом трубопровода при перемещении с поливной водой. В данном рассмотрении фланцевым соединением отрезков трубы друг с другом можно пренебречь, так как при длине трубопровода секции $l = 65$ м таких соединений будет 10–12. Преобразовав выражение (4.13), получим вес сухого трубопровода:

$$P_{вГ} = \pi b_{ст} (d_{внут} + b_{ст}) l \rho_{ст} g (1 + \alpha_\phi), \quad (4.14)$$

где $b_{ст}$ – толщина стенки трубопровода, м; $d_{внут}$ – внутренний диаметр трубопровода, м; l – длина трубопровода секции, м; $\rho_{ст}$ – плотность стали, из которой выполнен трубопровод [20] (например для стали 3 $\rho_{ст} = 7869$ кг/м³); g – ускорение свободного падения [20], $g = 9,81$ м/с².

Выразим (4.14) через наружный диаметр трубопровода d (м):

$$P_{вГ} = \pi b_{ст} (d - b_{ст}) l \rho_{ст} g (1 + \alpha_\phi). \quad (4.15)$$

Вес поливной воды внутри трубопровода определяется в статическом положении с учетом реакции воды на входе и выходе. Принимая во внимание идеальный случай, когда реакция (импульс) выхода воды компенсируется реакцией воды на входе в трубопровод, достаточно рассмотреть вес воды в статическом состоянии:

$$P_{\text{ВВ}} = \gamma_{\text{В}} V_{\text{В}}, \quad (4.16)$$

где $\gamma_{\text{В}}$ – удельный вес поливной воды [20, 98], Н/м³; $V_{\text{В}}$ – объем, занимаемый поливной водой в водораспределительном трубопроводе и гибких отводящих трубках дождеобразующих устройств, м³.

Объем воды, находящейся внутри гибких трубок дождеобразующих устройств, пренебрежимо мал по сравнению с объемом воды в водораспределительном трубопроводе. Учет данного объема приведет к сложным расчетам и в целом не повлияет на цель поиска решения, поэтому рассмотрим объем воды только внутри водораспределительного трубопровода, выраженного через его наружный диаметр d (м):

$$P_{\text{ВВ}} = \pi l \rho_{\text{В}} g \left(b_{\text{СТ}}^2 - d b_{\text{СТ}} + \frac{d^2}{4} \right), \quad (4.17)$$

где $\rho_{\text{В}}$ – плотность воды [20, 98, 296], $\rho_{\text{В}} = 1000$ кг/м³.

Тогда с учетом выражений (4.13)–(4.17) выражение (4.12) примет вид:

$$P_{\text{В}} = \pi \rho_{\text{СТ}} g l (b_{\text{СТ}} d - b_{\text{СТ}}^2) (1 + \alpha_{\text{Ф}}) + \pi \rho_{\text{В}} g l \left(b_{\text{СТ}}^2 - b_{\text{СТ}} d + \frac{d^2}{4} \right) + P_{\text{ВО}}. \quad (4.18)$$

Для упрощения выражения (4.18) преобразуем постоянные величины, а длину секции примем $l = 65$ м:

$$P_{\text{В}} = B (b_{\text{СТ}} d - b_{\text{СТ}}^2) + G \left(b_{\text{СТ}}^2 - b_{\text{СТ}} d + \frac{d^2}{4} \right) + P_{\text{ВО}}, \quad (4.19)$$

или, раскрыв скобки:

$$P_{\text{В}} = b_{\text{СТ}}^2 (B - G) + b_{\text{СТ}} d (B - G) + G \frac{d^2}{4} + P_{\text{ВО}}, \quad (4.20)$$

где B и G – постоянные, зависящие от плотности стали и поливной воды, ускорения свободного падения и длины трубопровода ($l = 65$ м), $B = 16,54$ МН/м²; $G = 2,00$ МН/м².

Принимая во внимание детерминированность параметров выражений (4.20) и (4.10), а также задаваясь параметрами колеса и передачи, рассмотрим преобразованное выражение мощности электродвигателя опорной тележки секции длиной 65 м:

$$P_{\text{двГ1}} = \frac{\mu \left[b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d (B - G) + G \frac{d^2}{4} + P_{\text{вО}} \right] r \omega_{\text{дв}}}{i \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}}}, \quad (4.21)$$

где μ – коэффициент сцепления колес с грунтом; r – радиус колес, м; $\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость электродвигателя, рад/с.

Из выражения (4.21) видно, что мощность на валу электродвигателя прямо пропорционально зависит от диаметра и толщины стенки трубопровода. Уменьшение диаметра трубопровода приводит к снижению металлоемкости, а также объема транспортируемой поливной воды, что, соответственно, снижает вес секции ДМ. Тогда уменьшаются нагрузка электропривода и потребление энергии. Нагрузка электропривода снижается также при изменении толщины стенки водораспределительного трубопровода. Однако стенки трубопровода и конструкция фермы несут механическую нагрузку, не допуская излома трубопровода при его перемещении. Поэтому для данного идеального случая плавное изменение толщины стенки не рассматривается.

Рассмотрим возможное изменение диаметра трубопровода для одной секции дождевальной машины кругового действия. Предварительно можно представить, что по всей длине пролета секции диаметр трубопровода можно уменьшить до величины диаметра гибкого трубопровода дождеобразующего устройства (рисунок 4.5).

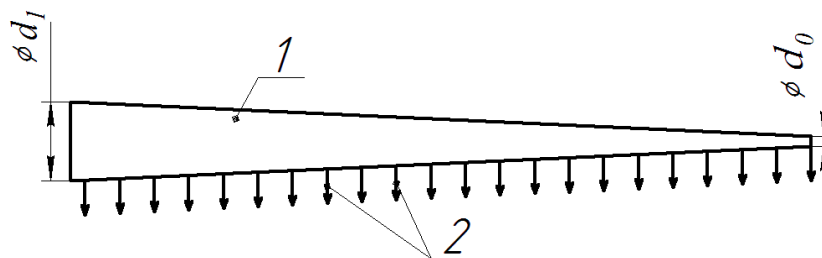


Рисунок 4.5 – Плавное снижение диаметра: 1 – водораспределительный трубопровод; 2 – гибкие трубопроводы дождеобразующих устройств; d_1 и d_0 – внешние диаметры соответственно в начале и конце пролета секции

Рассматривая изменение диаметра для одной секции, нельзя применять его для расчета всей дождевальной машины, поскольку модели движения воды будут иметь существенные различия [120, 122, 125, 126]. Секция дождевальной машины помимо опорной тележки характеризуется длиной пролета водораспределитель-

ного трубопровода, диаметром водораспределительного трубопровода, количеством и диаметром гибких трубопроводов дождеобразующих устройств, а также расстоянием между ними. Учитывая эти параметры, уменьшение диаметра водораспределительного трубопровода до минимального значения приведет к увеличению потерь напора нагнетательного насоса, снижению скорости движения жидкости и необходимости увеличения давления. Рассмотрим изменение этих параметров на схеме модели движения поливной воды в трубопроводе (рисунок 4.6).

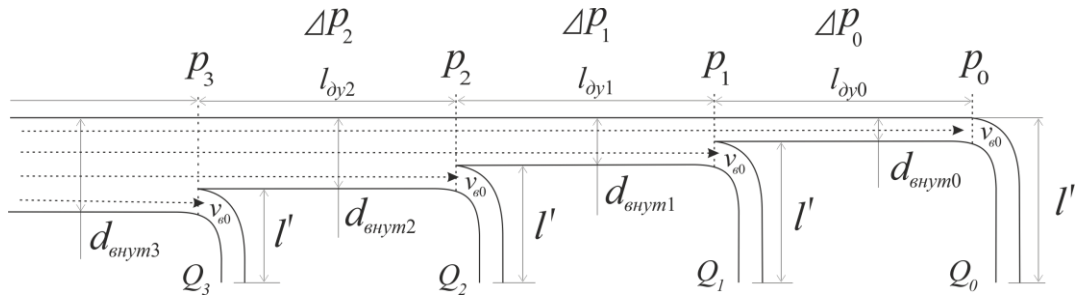


Рисунок 4.6 – Схема модели движения поливной воды в трубопроводе секции: Δp_i – потери давления на i -м участке; p_i – давление на i -м участке; Q_i – подача насоса на i -м участке; $l_{дыi}$ – расстояние между отводами дождеобразующих устройств i -го участка; l' – длина гибкого трубопровода дождеобразующих устройств

Анализ показывает, что уменьшить диаметр до значения диаметра гибкого трубопровода дождеобразующих устройств нельзя, поэтому необходимо определить минимально допустимое значение диаметра в конце водораспределительного трубопровода при сохранении гидравлических параметров в допустимых значениях.

Внутренний диаметр в начале и конце водораспределительного трубопровода можно определить через скорость движения воды v_v (м/с) и подачу насоса Q (м³/с):

$$v_v = \frac{4Q}{\pi d_{\text{внут}}^2}. \quad (4.22)$$

Если принять скорость движения поливной воды постоянной на протяжении всего трубопровода секции ($v_v = \text{const}$), а подачу насоса в каждый отвод дождеобразующих устройств одинаковой и равной Q_0 , то по количеству отводов $n_{\text{от}}$ можно определить отношение внутренних диаметров в начале и конце линии, пользуясь выражением (4.22):

$$\frac{4n_{\text{от}}Q_0}{\pi d_{\text{внут-п}}^2} = \frac{4Q_0}{\pi d_{\text{внут0}}^2}, \quad (4.23)$$

или внутренний диаметр в конце водораспределительного трубопровода секции:

$$d_{\text{внут}0} = d_{\text{внут-п}} \sqrt{\frac{1}{n_{\text{от}}}}. \quad (4.24)$$

Если водораспределительный трубопровод имеет $n_{\text{от}} = 25$ отводов дождеобразующих устройств, а в начале внутренний диаметр составляет 153 мм, то при $v_{\text{в}} = \text{const}$ и при $Q_0 = Q_1 = \dots = Q_{\text{пот}}$ внутренний диаметр в конце трубопровода, согласно выражению (4.22), – $d_{\text{внут}0} = 31$ мм (точка *A* на рисунке 4.7).

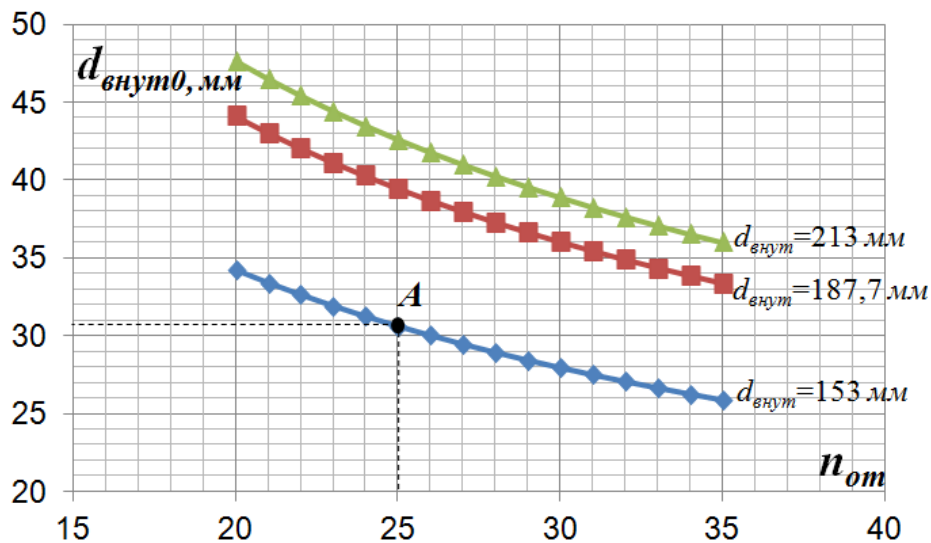


Рисунок 4.7 – Зависимость внутреннего диаметра в конце водораспределительного трубопровода секции от числа отводов дождеобразующих устройств

Однако, согласно [120, 139, 187, 188, 195, 261, 296, 351, 361], в трубопроводе возникают потери напора (давления) на трение, которые зависят от скорости движения потока жидкости, диаметра трубопровода, материала трубопровода, а также от его длины. При неизменном диаметре потери линейно пропорциональны длине трубопровода. Плавное уменьшение диаметра от начала к концу трубопровода, как в нашем идеальном случае, приводит к увеличению потерь по экспоненциальной зависимости.

Рассмотрим секцию дождевальной машины с длиной l водораспределительного трубопровода, в котором потери складываются из потерь давления на дождеобразующие устройства, потерь по длине и потерь от плавного уменьшения диаметра. Примем допущение, что при плавном уменьшении диаметра от начала к концу трубопровода потери давления на дождеобразующие устройства остаются неизменными

ми. Тогда рассмотрим зависимость потерь давления от плавного снижения диаметра как частный случай ступенчатого снижения диаметра (рисунок 4.8) [120].

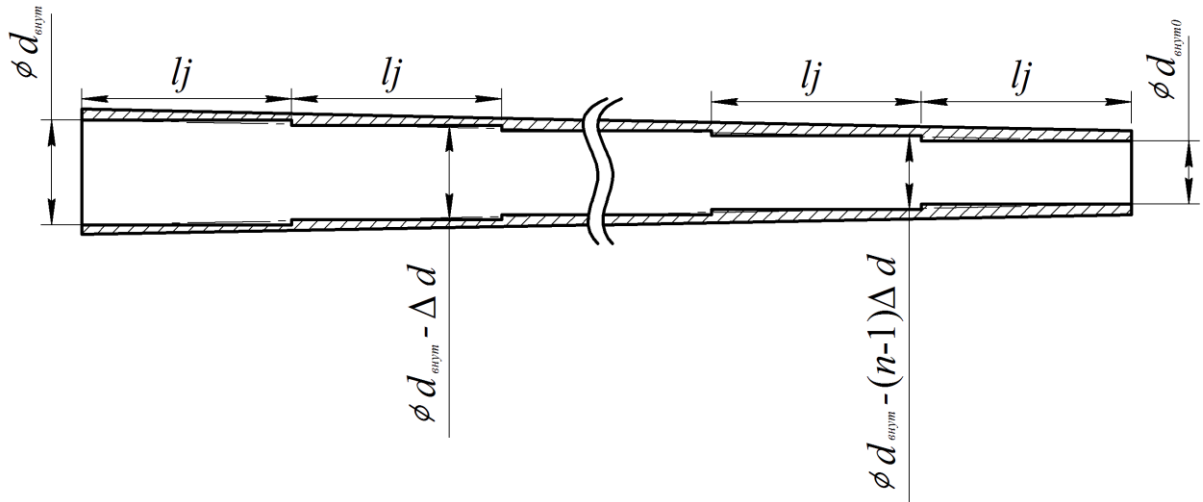


Рисунок 4.8 – Вид ступенчатого снижения диаметра водораспределительного трубопровода

Если трубопровод длиной l разделить на n равных участков длиной lj ($n \rightarrow \infty$), то потери на каждом участке составят:

$$\begin{aligned} \Delta p_d = & \frac{\lambda j \rho_B v_B^2}{2d_{\text{внут}}} + \frac{\lambda j \rho_B v_B^2}{2(d_{\text{внут}} - \Delta d)} + \frac{\lambda j \rho_B v_B^2}{2(d_{\text{внут}} - 2\Delta d)} + \dots \\ & \dots + \frac{\lambda j \rho_B v_B^2}{2(d_{\text{внут}} - (n-1)\Delta d)} + \frac{\lambda j \rho_B v_B^2}{2d_{\text{внут0}}}, \end{aligned} \quad (4.25)$$

где $d_{\text{внут0}} = d_{\text{внут}} - n\Delta d$.

Приняв скорость потока поливной воды на всем протяжении трубопровода одинаковой, а длину отрезков $lj \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, после преобразования (4.25) получим:

$$\Delta p_d = \frac{\lambda \rho_B v_B^2}{4} \left(\frac{d_{\text{внут}} + d_{\text{внут0}}}{d_{\text{внут}} d_{\text{внут0}}} \right), \quad (4.26)$$

где l – длина водораспределительного трубопровода, $l = nj$.

Таким образом, выражение (4.26) показывает зависимость потерь при плавном изменении внутреннего диаметра от начального $d_{\text{внут}}$ до конечного $d_{\text{внут0}}$.

Потери давления при плавном снижении диаметра существенно отличаются от потерь давления по длине. Например, для точки A на рисунке 4.7 при начальном внутреннем диаметре $d_{\text{внут}} = 153$ мм и конечном диаметре $d_{\text{внут0}} = 32$ мм потери

давления из-за изменения диаметра будут в 3,0 раза больше потерь по длине (рисунок 4.9):

$$\frac{d_{\text{внут}0}}{d_{\text{внут}}} \cdot 100 \% = \frac{32}{153} \cdot 100 \% = 20,9 \%;$$

$$\Delta p_d = 3,0 \Delta p_l, \quad (4.27)$$

где Δp_l – потери давления по длине без изменения диаметра водораспределительного трубопровода.

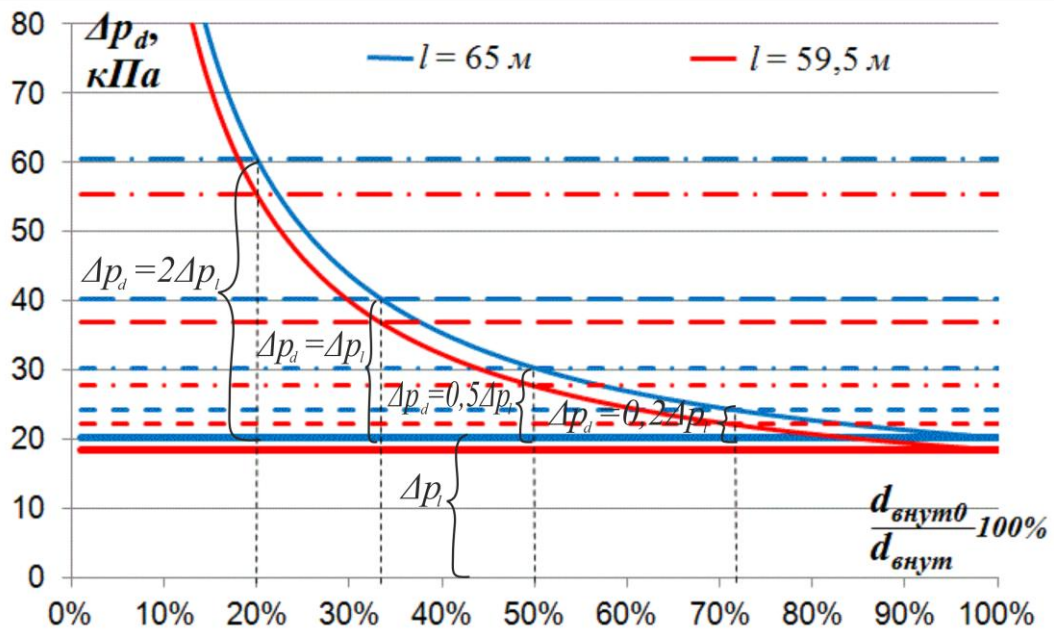


Рисунок 4.9 – Зависимость потерь давления от плавного снижения диаметра

Определим возможную величину снижения нагрузки на электропривод по выражению (4.21) и на основе полученных данных сопоставим ее с величиной потерь давления при плавном уменьшении диаметра.

При плавном изменении диаметра трубопровода нагрузка на электропривод будет определяться по среднему диаметру $d_{\text{внут-ср}}$, если толщина стенки постоянна ($b_{\text{ст}} = \text{const}$):

$$d_{\text{внут-ср}} = \frac{d_{\text{внут}} + d_{\text{внут}0}}{2}. \quad (4.28)$$

Тогда мощность на валу электродвигателя опорной тележки секции ДМ (рисунок 4.10):

$$P'_{\text{двГ1}} = \frac{\mu \left[b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} \left(\frac{d + d_0}{2} \right) (B - G) + G \frac{(d + d_0)^2}{16} + P_{\text{вО}} \right] r\omega_{\text{дв}}}{i\eta_{\text{дв}}\eta_{\text{пер}}}, \quad (4.29)$$

где d – наружный диаметр в начале трубопровода, $d = d_{\text{внут}} + 2b_{\text{ст}}$, м; d_0 – наружный диаметр в конце трубопровода, $d_0 = d_{\text{внут0}} + 2b_{\text{ст}}$, м.

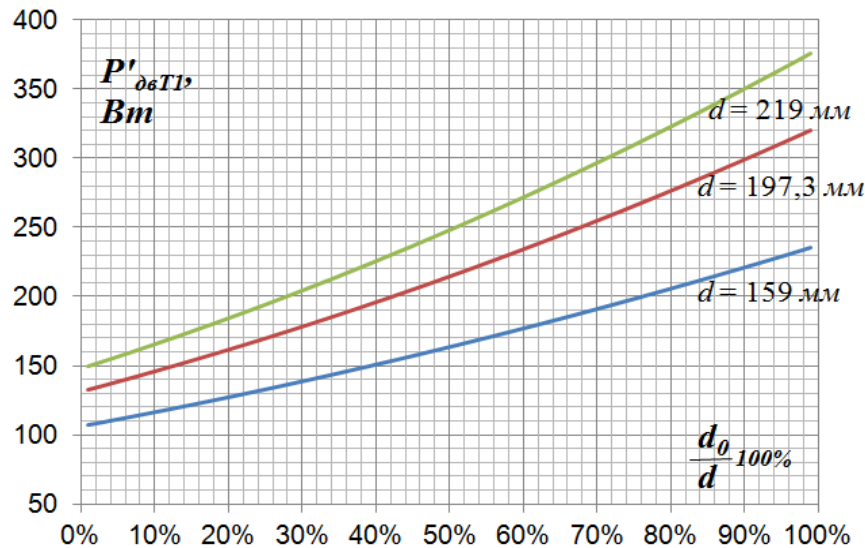


Рисунок 4.10 – Зависимость мощности на валу электродвигателя от изменения диаметра водораспределительного трубопровода длиной 65 м

Оценим долю снижения мощности, если доля снижения диаметра:

$$\Delta d = \frac{d - d_0}{d}. \quad (4.30)$$

Тогда внутренний диаметр в конце трубопровода:

$$d_0 = d (1 - \Delta d). \quad (4.31)$$

Доля снижения мощности на валу:

$$\Delta P' = \frac{P_{\text{двГ1}} - P'_{\text{двГ1}}}{P_{\text{двГ1}}} = 1 - \frac{P'_{\text{двГ1}}}{P_{\text{двГ1}}}. \quad (4.32)$$

С учетом (4.31):

$$\Delta P' = 1 - \frac{b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d (B - G) \left[\frac{2 - \Delta d}{2} \right] + G \frac{d^2}{4} \left[\frac{(2 - \Delta d)^2}{4} \right] + P_{\text{вО}}}{b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d (B - G) + G \frac{d^2}{4} + P_{\text{вО}}}. \quad (4.33)$$

Выразим через долю снижения диаметра Δd показатель увеличения потерь давления σ_p относительно потерь давления по длине Δp_l :

$$\sigma_p = \frac{\Delta p_d}{\Delta p_l} = \frac{\lambda \rho_B v_B^2}{4} \left[\frac{d_{\text{внут}} + d_{\text{внут}}(1 - \Delta d)}{d_{\text{внут}}^2 (1 - \Delta d)} \right] \frac{2d_{\text{внут}}}{\lambda \rho_B v_B^2}, \quad (4.34)$$

или после преобразования:

$$\sigma_p = \frac{\Delta p_d}{\Delta p_l} = \frac{2 - \Delta d}{2 - 2\Delta d}. \quad (4.35)$$

Плавное снижение диаметра на 50 % приводит к снижению нагрузки на электропривод, которое заключается в снижении потребляемой мощности электродвигателя на 32–35 % (рисунок 4.11). Однако это также влечет за собой увеличение потерь давления (напора) в 1,5 раз больше потерь давления (напора) по длине Δp_l (относительно потерь при неизменном диаметре). Анализируя график на рисунке 4.11, видим, что большее снижение диаметра ($\Delta d > 50\%$) вызывает резкое увеличение потерь – в 2,0 раза и более (рисунок 4.12).

Таким образом, по рисункам 4.11 и 4.12 видно, что снижение диаметра на 50 % позволяет снизить потребляемую мощность и, соответственно, энергопотребление на 32–35 %, что приводит к увеличению потерь давления в пределах ошибки инженерных расчетов [296]. Поэтому можно справедливо считать, что в идеальном случае для снижения нагрузки на электропривод и экономии до 35 % энергии на перемещение водораспределительного трубопровода входной диаметр можно уменьшить в 2 раза.

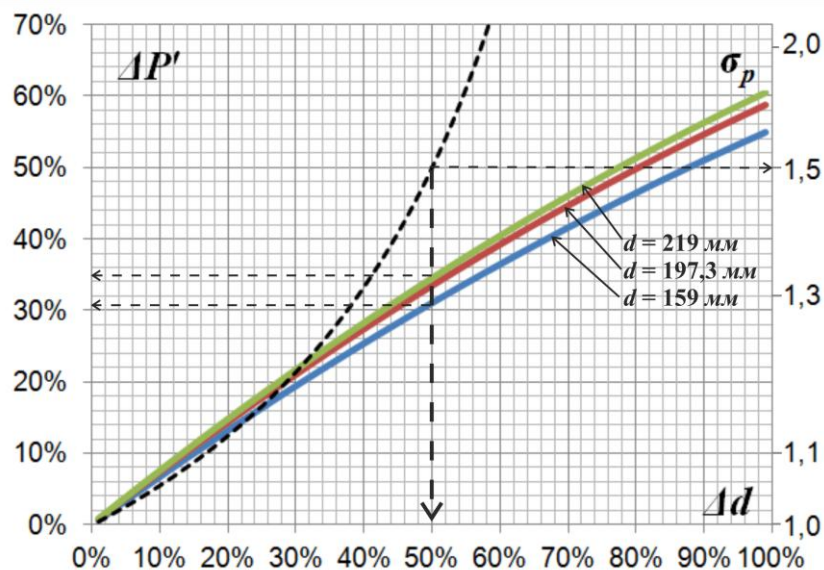


Рисунок 4.11 – Зависимость потерь давления и доли снижения нагрузки электропривода от плавного снижения диаметра водораспределительного трубопровода

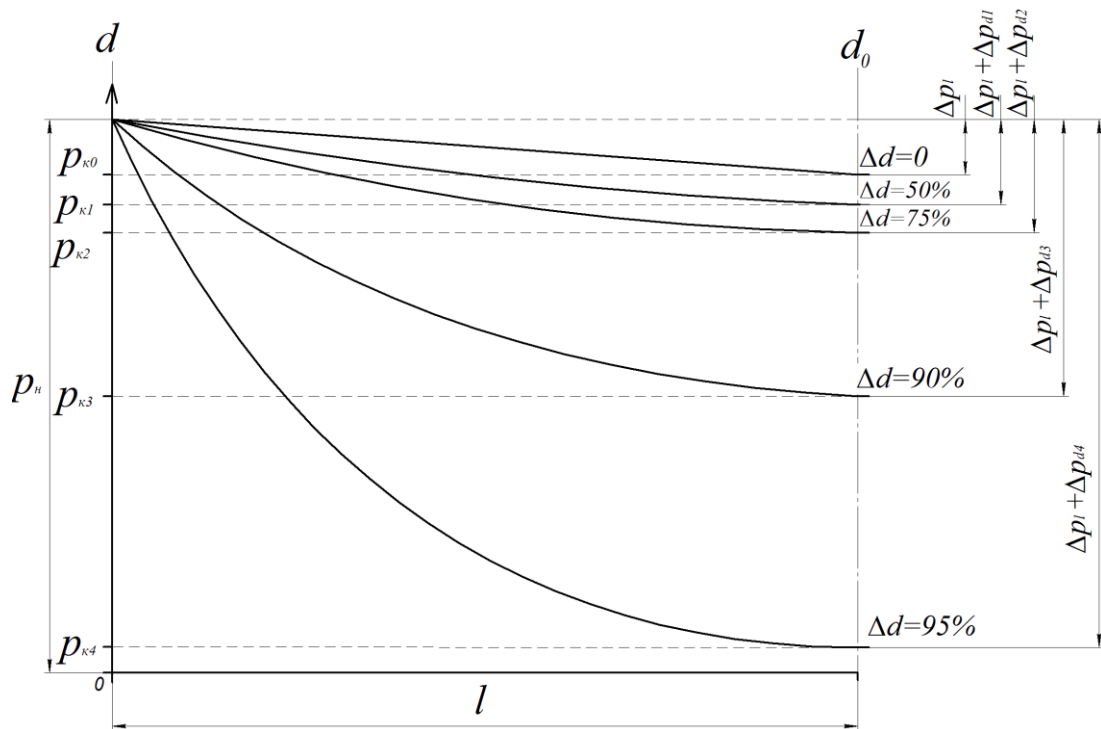


Рисунок 4.12 – Графическое представление потерь давления в конце водораспределительного трубопровода с изменением диаметра на Δd : p_n – давление на входе; p_{κ} – давление на выходе из водораспределительного трубопровода

Оценим влияние толщины стенки трубопровода на потребляемую мощность электродвигателя по выражению (4.33). Трубопровод может иметь толщину стенки $b_{ст1} = 3,0$ мм; $b_{ст2} = 2,8$ мм; $b_{ст3} = 2,5$ мм. Эта зависимость показана на рисунке 4.13.

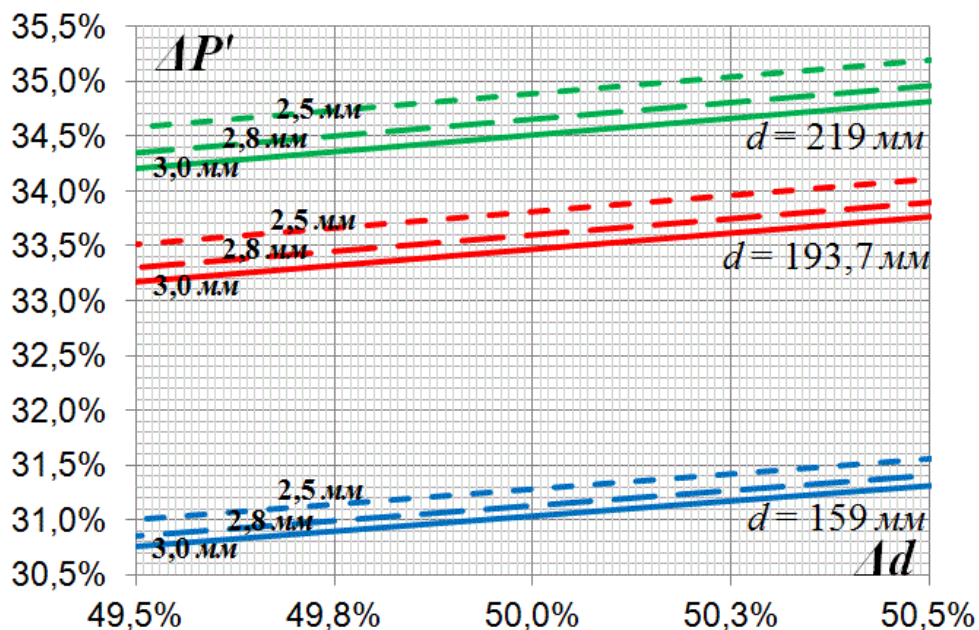


Рисунок 4.13 – Зависимость доли снижения нагрузки электропривода от толщины стенки $b_{ст}$ трубопровода различного наружного диаметра

Таким образом, основная нагрузка электропривода формируется весом в точке касания колес с грунтом, который определяется тремя составляющими: весом опорной тележки с колесами $P_{\text{вО}}$; весом сухого трубопровода $P_{\text{вТ}}$; весом поливной воды $P_{\text{вв}}$. Значительное влияние на мощность электродвигателя оказывают диаметр и толщина стенки водораспределительного трубопровода. Рассматривая только одну секцию, плавное снижение диаметра позволяет снизить нагрузку на электропривод и потребляемую мощность электродвигателя при соблюдении основных гидротехнических требований к параметрам полива. Исследования показали, что при плавном уменьшении диаметра в 2 раза потери давления увеличиваются в пределах ошибки инженерных расчетов, что способствует снижению мощности на валу электродвигателя на 32–35 %. При изменении толщины стенки доля снижения мощности оказывается несущественной – 0,1–0,5 %.

Однако в связи с особенностью изготовления труб стандартных диаметров [115, 187, 188, 262] плавное снижение диаметра водораспределительного трубопровода выполнить сложно, поэтому полученные данные становятся ориентиром для максимально возможного уменьшения мощности. Эффект снижения энергопотребления на перемещение трубопровода можно получить при дискретном уменьшении диаметра.

Идеальный случай плавного снижения диаметра на практике реализовать невозможно, так как существует принятый типоразмер диаметров металлической трубы со стандартными значениями 114,0 мм; 133,0; 140,0; 159,0; 168,0; 197,3; 219 мм и т. д., которые используют при конструировании ДМ.

Оценим долю снижения энергопотребления при ступенчатом снижении диаметра. Из рисунка 4.14 видно, что рассмотреть мощность электродвигателя, затрачиваемую на перемещение трубопровода, как в предыдущем случае, будет не корректно, потому что ступенчатое снижение диаметра может быть выполнено по секциям. Например, для первой секции длиной l_1 диаметр в начале d_1 и конце трубопровода одинаков, тогда мощность первой секции будет определяться по исходным данным выражения (4.21).

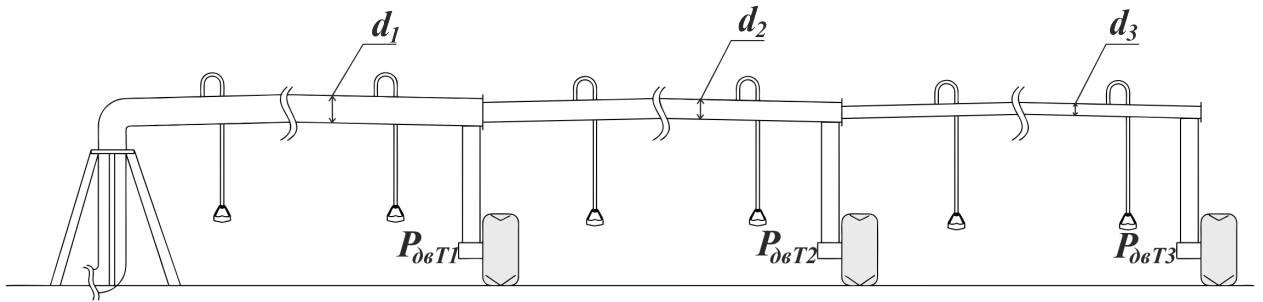


Рисунок 4.14 – Вид ступенчатого посекционного уменьшения диаметра трубопровода ДМ

Если же для секции диаметр трубопровода ступенчато изменяется (рисунок 4.15) до значения ближайшего стандартного d_2 (на величину Δd) при неизменной толщине стенки ($b_{ст} = \text{const}$), то с учетом предыдущих исследований мощность можно определить следующим образом:

$$P''_{обГТ1-11/2} = \frac{\mu r \omega_{дв}}{i \eta_{дв} \eta_{пер}} \left[b_{ст}^2 (G' - B')(l_1 + l_2) + b_{ст} (B' - G')(d_1 l_1 + d_2 l_2) + \frac{G'}{4} (d_1^2 l_1 + d_2^2 l_2) + P_{во} \right], \quad (4.36)$$

где l_1 и l_2 – длина трубопровода в секции соответственно диаметром d_1 и d_2 , м; B' и G' – постоянные, зависящие от плотностей стали и поливной воды, ускорения свободного падения, $B' = 240,3 \text{ кН/м}^2$; $G' = 30,8 \text{ кН/м}^2$ (см. рисунок 4.15).

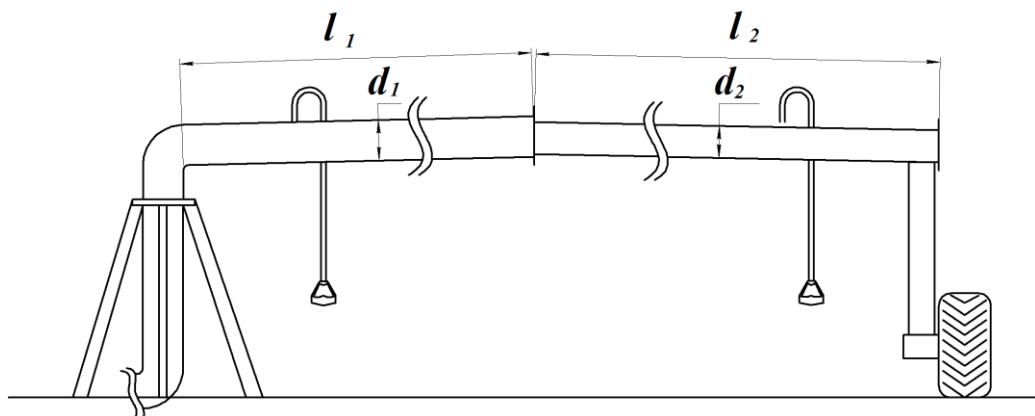


Рисунок 4.15 – Вид ступенчатого уменьшения диаметра трубопровода одной секции ДМ

Согласно выражению (4.36) мощность зависит от соотношения длин. Длина l_1 при диаметре d_1 может быть больше или меньше длины l_2 при диаметре d_2 . Рассмотрим несколько случаев:

- 1) $l_1 = l_2$;
- 2) $l_1 > l_2$;

3) $l_1 < l_2$.

Если представить, что

$$\frac{l_1}{l} = a, \quad (4.37)$$

то

$$l_2 = l(1 - a), \quad (4.38)$$

где a – коэффициент пропорциональности длины l_1 с большим диаметром ($d_1 > d_2$) ближайшего стандартного значения на величину Δd , $0 < a < 1$.

Далее обозначим:

$$\Delta d = \frac{d_1 - d_2}{d_1}. \quad (4.39)$$

Доля снижения мощности на валу при ступенчатом снижении диаметра (рисунок 4.16):

$$\Delta P'' = \frac{P'_{\text{двТ1-1}} - P''_{\text{двТ11112}}}{P_{\text{двТ1-1}}} = 1 - \frac{P''_{\text{двТ1-1112}}}{P_{\text{двТ1-1}}}. \quad (4.40)$$

С учетом (4.36) и длины пролета секции $l = 65$ м:

$$\Delta P'' = 1 - \frac{b_{\text{cr}}^2(G - B) + b_{\text{cr}}(B - G)[d_1 a + d_2(1 - a)] + \frac{G}{4}[d_1^2 a + d_2^2(1 - a)] + P_{\text{в0}}}{b_{\text{cr}}^2(G - B) + b_{\text{cr}} d_1(B - G) + G \frac{d_1^2}{4} + P_{\text{в0}}}. \quad (4.41)$$

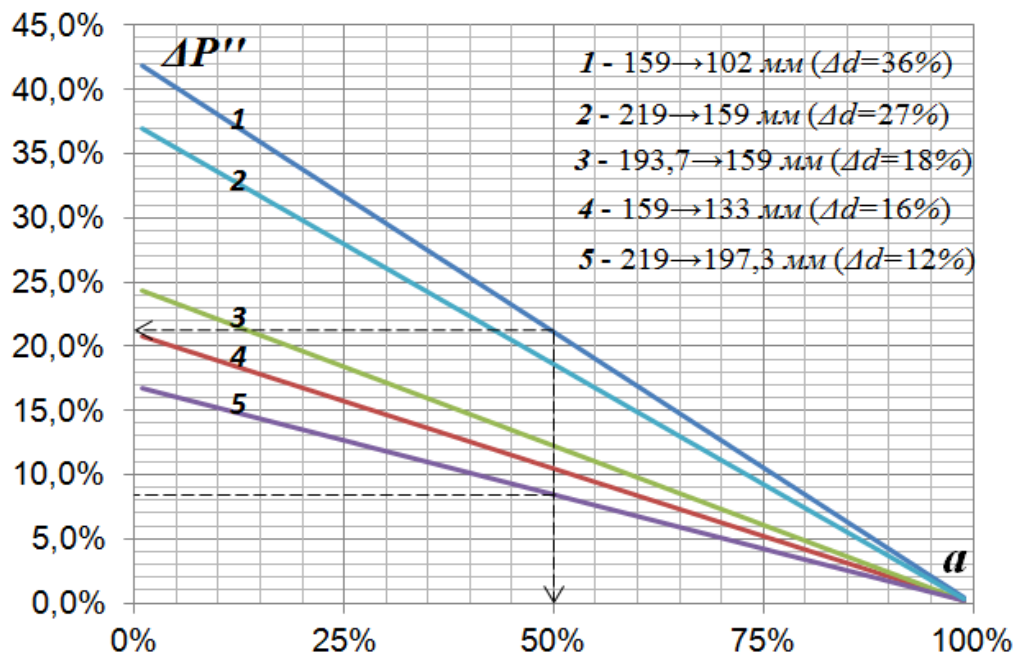


Рисунок 4.16 – Снижение нагрузки электропривода при ступенчатом снижении диаметра водораспределительного трубопровода секции длиной $l = 65$ м и коэффициенте пропорциональности длин a

Одноступенчатое уменьшение диаметра представлено выражением (4.41). При уменьшении диаметра на одну ступень при длине трубопровода секции $l = 65$ м и коэффициенте пропорциональности длин $a = 50$ % (например, длиной l_1 выполнен трубопровод диаметром $d_1 = 159$ мм, а длиной l_2 – диаметром $d_2 = 102$ мм, доля снижения диаметра $\Delta d = 36$ %) потребляемая мощность электродвигателя снижается на 8,7–21,5 %. Максимальное снижение мощности наблюдается при переходе с 159 на 102 мм – 21,5 % (при $\Delta d = 36$ %), а минимальное – при переходе с 219 на 193,7 мм – 8,7 % (при $\Delta d = 12$ %).

Двух-, трех-, четырехступенчатый переход математически описать сложнее. На практике переходы 2, 3, 4 ступеней диаметров не требуются в связи с высокими потерями давления. Однако поэтапным вычислением в соответствии с выражением (4.41) можно определить долю снижения нагрузки электропривода и энергопотребления.

На рисунке 4.14 ступенчатый переход представлен по секциям. Как уже отмечалось, мощность определяется в соответствии с выражением (4.21). Если одна секция выполнена большим диаметром d_1 , а другая – меньшим диаметром d_2 , то потребляемые мощности электродвигателей, установленных в составе электропривода колес опорных тележек, будут отличаться друг от друга на величину ΔP ". При этом продолжительность работы этих электроприводов будет также отличаться в связи с тем, что каждая секция проходит разный путь s_{Ti} в соответствии с выражениями (4.1) и (4.2). Количество потребляемой электроэнергии – это произведение мощности на продолжительность работы электропривода. Поэтому рассмотрим снижение затрат энергии при ступенчатом изменении диаметра по секциям.

Пусть ДМ состоит из n секций, тогда полное энергопотребление ДМ будет определяться мощностью электродвигателей, системы управления и продолжительностью их работы. Мощность системы управления пренебрежимо мала по сравнению с мощностью электродвигателя, поэтому в данном случае примем, что затраты энергии на одну секцию будут определяться по мощности электродвигателя. Тогда энергопотребление ДМ на выполнение полива с одним полным оборотом ДМ без учета количества пусков и остановок:

$$W = P_{двТ1}t_{p1} + P_{двТ2}t_{p2} + \dots + P_{двТn}t_{pn}, \quad (4.42)$$

где $t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pn}$ – продолжительность работы 1-го, 2-го, ..., n -го электродвигателя мощностью $P_{двТ1}, P_{двТ2}, \dots, P_{двТn}$, ч.

Если каждая секция укомплектована электроприводами с одинаковой частотой вращения $\omega_{двТ1} = \omega_{двТ2} = \dots = \omega_{двТn}$ ($\eta_{дв1} = \dots = \eta_{двn}$) и одинаковыми параметрами редукторов ($i_1 = i_2 = \dots = i_n$; $\eta_{пер1} = \eta_{пер2} = \dots = \eta_{перn}$), то скоростные характеристики также будут одинаковыми, а продолжительность работы каждой секции пропорциональна пройденному пути.

Продолжительность работы каждой секции:

$$\begin{aligned} t_{p2} &= 2t_{p1}; \\ t_{p3} &= 2t_{p2}; \\ t_{pn} &= 2t_{pn-1}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Тогда продолжительность потребления энергии ДМ можно рассчитать как арифметическую прогрессию продолжительности выполнения t_p одного круга первой секции при количестве секций n . Если все секции укомплектованы электродвигателями с одинаковой мощностью, то количество энергии:

$$W = nP_{двТ1}t_p \left(\frac{1+n}{2} \right). \quad (4.44)$$

При одноступенчатом уменьшении диаметра, когда часть секций n_1 , ближайших к неподвижной опоре, выполнены большим диаметром d_1 , а остальная часть секций n_2 – диаметром d_2 (соответственно потребляемые мощности для первой и второй части – $P_{дв1}$ и $P_{дв2}$), то количество энергии:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= n_1 P_{дв1} t_p \left(\frac{1+n_1}{2} \right) + n_2 P_{дв2} t_p \left(\frac{(n_1+1)+n}{2} \right), \\ n &= n_1 + n_2, \\ P_{дв1} &> P_{дв2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.45)$$

где n – общее количество секций ДМ.

Если представить количество секций с диаметром d_1 как

$$n_1 = un, \quad (4.46)$$

где u – коэффициент пропорциональности секций диаметром d_1 к общему числу секций n ($0 < u < 1$),

тогда количество секций диаметром d_2 :

$$n_2 = n(1 - u). \quad (4.47)$$

Представим, что мощность при меньшем диаметре d_2 определяется через $\Delta P''$ (согласно выражению (4.41)) относительно $P_{дв1}$:

$$P_{дв2} = P_{дв1} (1 - \Delta P''). \quad (4.48)$$

Подставляя выражения (4.46)–(4.48) в (4.45), после преобразования получим зависимость энергопотребления при одноступенчатом снижении диаметра трубопровода:

$$W_1 = P_{дв1} t_p \left[un \left(\frac{1+un}{2} \right) + n(1-u)(1-\Delta P'') \left(\frac{un+1+n}{2} \right) \right]. \quad (4.49)$$

Оценим, насколько снизится потребление энергии при одноступенчатом изменении диаметра (рисунок 4.17):

$$\Delta W = \frac{W - W_1}{W} = 1 - \frac{\left[un \left(\frac{1+un}{2} \right) + n(1-u)(1-\Delta P'') \left(\frac{un+1+n}{2} \right) \right]}{n \left[\frac{1+n}{2} \right]}. \quad (4.50)$$

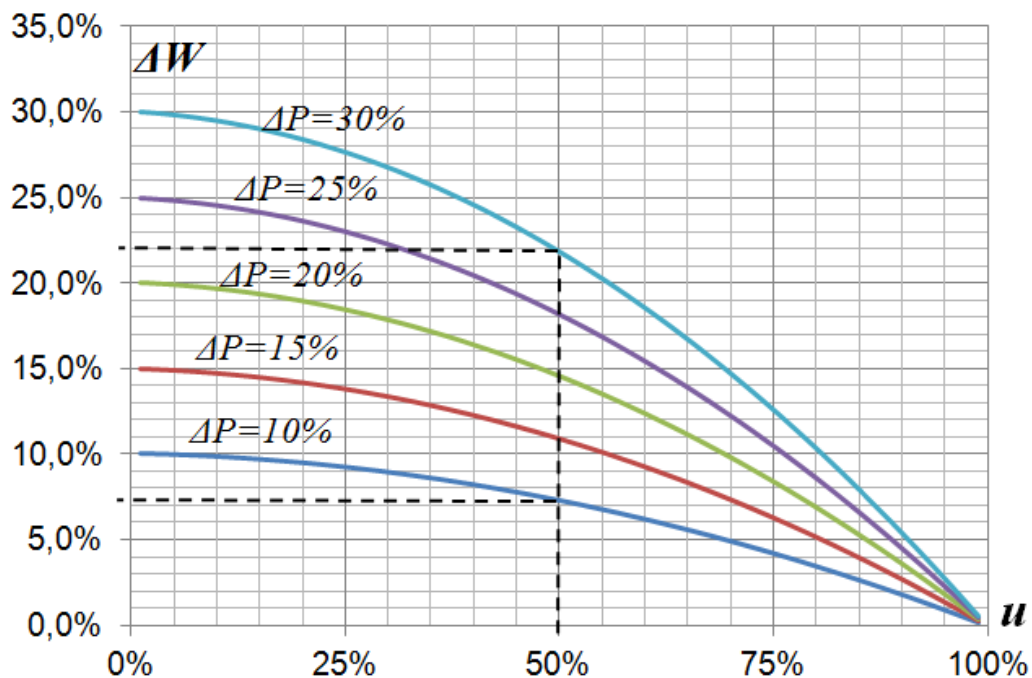


Рисунок 4.17 – Зависимость снижения энергопотребления при одноступенчатом снижении диаметра ДМ с коэффициентом пропорциональности u , количеством секций $n = 10$ стандартных значений диаметров при пропорциональном снижении мощности на 10–30 %

Таким образом, плавное изменение диаметра водопроводящего трубопровода способствует повышению энергоэффективности. В идеальном случае это дает энергетический и экономический эффекты. Однако в практических условиях данный способ реализовать невозможно из-за конструктивных особенностей машины, трубопровод которой собран из 6- или 12-метровых тонкостенных ($b_{ст} = 2,5 \dots 3,5$ мм) металлических труб, и технологических особенностей, которые заключаются в изготовлении труб стандартных диаметров ($d = 102,0$ мм; 133,0; 140,0; 159,0; 168,0; 193,7; 219,0 мм). Поэтому следует уменьшать диаметр ступенчато.

Установлено, что при уменьшении диаметра водораспределительного трубопровода не более чем на 50 % (что увеличивает потери давления до 1,5 раза от потерь по длине) можно снизить нагрузку на электропривод на 31–34 %. Ступенчатое снижение диаметра стандартных типоразмеров труб водораспределительного трубопровода (159 → 140 мм; 219 → 159 мм и т. п.) позволяет снизить нагрузку на 8,7–21,5 %. Посекционное уменьшение диаметра трубопровода зависит от количества секций, выполненных большим диаметром. Установлено, что при коэффициенте пропорциональности секций $u = 50$ % достигается снижение энергопотребления водораспределения на 7–22 % и энергопотребление полива на 0,33–2,31 % в зависимости от ступени снижения диаметров и, соответственно, доли снижения мощности электродвигателя.

В структуре общего энергопотребления полива дождевальными машинами снижение диаметра способствует увеличению потерь и возрастанию нагрузки на насос водоподачи. Определим повышение нагрузки насоса водоподачи из-за изменения диаметра водораспределительного трубопровода дождевальной машины кругового действия.

Мощность, потребляемая электродвигателем насоса, определяется по формуле [187]:

$$P_{нас} = \frac{k_3 \rho_v g Q_n H}{\eta_n \eta_{пер} \eta_{дв}}, \quad (4.51)$$

где k_3 – коэффициент запаса по мощности, о. е.; ρ_v – плотность поливной воды, кг/м³; Q_n – подача насоса, м³/с; H – общий напор, создаваемый насосом, м; η_n – КПД насоса; $\eta_{пер}$ – КПД передачи; $\eta_{дв}$ – КПД электродвигателя.

Изменение диаметра водораспределительного трубопровода приведет к увеличению общего напора. Напор H насоса складывается из составляющих:

$$H = H_c + H_b + \Delta h, \quad (4.52)$$

где H_c – статический напор, который является суммой напоров всасывания и нагнетания, м; H_b – напор на выходе трубопровода, м; Δh – потери напора, зависящие от типа трубы, длины и диаметра, м.

Обозначим детерминированные параметры:

$$A = \frac{k_3 \rho_B g Q_H}{\eta_H \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{дв}}}. \quad (4.53)$$

Запишем мощность электродвигателя насоса при изменении диаметра водораспределительного трубопровода на величину Δd с учетом преобразований:

$$P'_{\text{нас}} = A \left(H_0 + \frac{\lambda_T l_T v_B^2}{2d_T g} + \frac{\lambda_{\text{ДМ1}} l_1 v_{1B}^2}{2d_1 g} + \frac{\lambda_{\text{ДМ2}} l_2 v_{2B}^2}{2d_0 g} \right), \quad (4.54)$$

где H_0 – сумма статического напора и напора на выходе трубопровода, м; d_T – диаметр водоподводящего трубопровода (от водоема до ДМ), м; l_T – длина водоподводящего трубопровода, м (примем допущение, что по всей длине водоподводящего трубопровода материал трубы и ее диаметр одинаковы); λ_T , $\lambda_{\text{ДМ1}}$, $\lambda_{\text{ДМ2}}$ – коэффициенты гидравлических потерь на трение движения потока поливной воды соответственно в водоподводящем трубопроводе, водораспределительном трубопроводе ДМ с диаметром d_1 и диаметром d_0 , о. е.; l_1 , l_2 – длины водораспределительного трубопровода ДМ соответственно с диаметрами d_1 и d_0 , м; v_B , v_{1B} , v_{2B} – скорости потоков поливной воды соответственно в водоподводящем трубопроводе, водораспределительном трубопроводе ДМ диаметром d_1 и диаметром d_0 , м/с.

Гидравлические потери на трение потока поливной воды зависят от вида течения (ламинарного или турбулентного) и рассчитываются на основе числа Рейнольдса [187–189]. Число Рейнольдса зависит от диаметра трубопровода, скорости потока и кинематической вязкости поливной воды, для нашего случая лежит в пределах 10^5 – 10^6 . Критическое значение числа Рейнольдса определяется особенностями оросительной сети, материалом и шероховатостью стенок трубы и т. п.

Согласно [189], коэффициент гидравлических потерь на трение можно определить для турбулентного течения по упрощенному выражению:

$$\lambda_T = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}, \quad (4.55)$$

где Re – число Рейнольдса.

Анализируя выражение (4.55) и данные [187–189] примем допущение, что коэффициенты гидравлических потерь в водоподводящем трубопроводе, водораспределительном трубопроводе ДМ диаметром d_1 и диаметром d_0 будут приблизительно равными:

$$\lambda_T \approx \lambda_{DM1} \approx \lambda_{DM2} = \lambda_{\pi}. \quad (4.56)$$

Скорость потока поливной воды уменьшается по длине за счет действия динамических сил на объем поливной воды, однако уменьшение диаметра приводит к увеличению скорости (для одинаковой подачи насоса). Примем также допущение, что скорость на всем пути движения потока поливной воды также приблизительно одинакова:

$$v_B \approx v_{1B} \approx v_{2B}. \quad (4.57)$$

Представим длину водораспределительного трубопровода l_{DM} как сумму длин l_1 и l_2 , тогда запишем:

$$\left. \begin{aligned} l_{DM} &= l_1 + l_2, \\ l_1 &= a' l_{DM}, \\ l_2 &= (1 - a') l_{DM}, \\ 0 &< a' < 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

Изменение диаметра с d_1 на d_0 выразим через относительный показатель снижения диаметра Δd :

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= \frac{d_1 - d_0}{d_1}, \\ d_0 &= d_1(1 - \Delta d), \\ 0 &< \Delta d < 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

Запишем мощность, потребляемую электродвигателем насоса, с учетом допущений и выражений (4.58) и (4.59):

$$P'_{\text{нас}} = A \left(H_0 + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{T}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{T}} g} + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{ДМ}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{1}} g} \left[\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right] \right). \quad (4.60)$$

Если сравнить для одинаковых условий эксплуатации ДМ мощность насоса при неизменном диаметре с мощностью насоса при изменении диаметра на величину Δd , то получим изменение потребляемой мощности на величину $\Delta P_{\text{нас}}$:

$$\Delta P_{\text{нас}} = \frac{P'_{\text{нас}} - P_{\text{нас}}}{P_{\text{нас}}} = \frac{H_0 + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{T}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{T}} g} + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{ДМ}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{1}} g} \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{H_0 + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{T}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{T}} g} + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{ДМ}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{1}} g}} - 1. \quad (4.61)$$

Обозначим сумму статического напора, напора на выходе трубопровода и потерь в водоподводящем трубопроводе с помощью коэффициента b' :

$$\left. \begin{aligned} H_0 + \frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{T}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{T}} g} &= b' \left(\frac{\lambda_{\text{п}} l_{\text{ДМ}} v_{\text{B}}^2}{2d_{\text{1}} g} \right) \\ 1 < b' < 20 \end{aligned} \right\} \quad (4.62)$$

Тогда изменение потребляемой мощности электродвигателя насоса составит (рисунок 4.18):

$$\Delta P_{\text{нас}} = \frac{b' + \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} - 1. \quad (4.63)$$

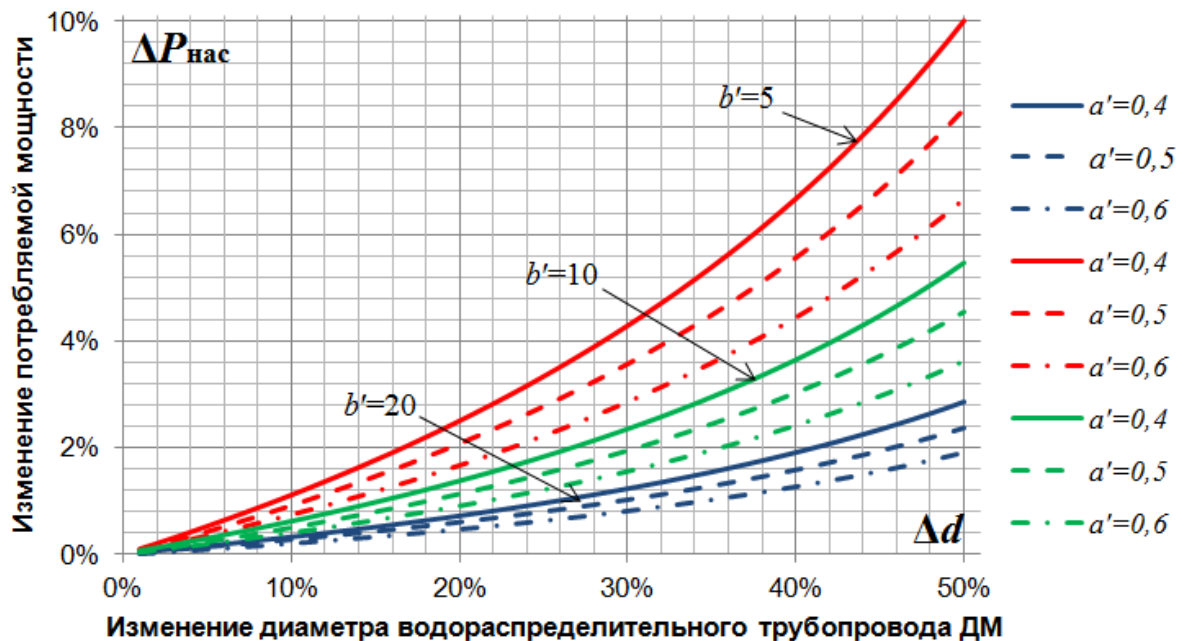


Рисунок 4.18 – Зависимость изменения потребляемой мощности электродвигателя насоса при изменении диаметра водораспределительного трубопровода ДМ

По рисунку 4.18 видно, что при изменении (уменьшении) диаметра трубопровода дождевальной машины на величину Δd потребляемая мощность электродвигателя насоса увеличивается и зависит от коэффициента пропорциональности длин водораспределительного трубопровода a' , а также от коэффициента пропорциональности потерь напора b' . Например, если водоподводящий трубопровод имеет длину значительно больше длины водораспределительного трубопровода и сумма статистического напора, напора на выходе трубопровода и потерь в водоподводящем трубопроводе в 20 и более раз выше потерь напора по длине трубопровода ДМ ($b' > 20$ – на рисунке 4.18 отмечены синим цветом), а половина водораспределительного трубопровода ДМ ($a' = 0,5$) будет выполнена диаметром 0,219 м, а вторая половина – диаметром 0,159 м ($\Delta d = 27\%$), то потребляемая мощность увеличится на 0,88 %. Однако при тех же условиях, но при коэффициенте пропорциональности потерь напора $b' \approx 5$ (если ДМ расположена рядом с водоемом на ровном рельефе, на рисунке 4.18 отмечено красным цветом), то потребляемая мощность электродвигателя насоса увеличится на 3,08 %.

Оценим изменение общего энергопотребления полива при изменении диаметра водораспределительного трубопровода ДМ, применив критериальный анализ:

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{ДМ}} \Delta W + \pi_{\text{нас}} \Delta W_{\text{нас}}, \quad (4.64)$$

где $\pi_{\text{ДМ}}$ и $\pi_{\text{нас}}$ – критерии подобия соответственно энергопотребления ДМ на водораспределение и энергопотребления насоса на водоподачу:

$$\left. \begin{aligned} \pi_{\text{ДМ}} &= \frac{W}{W_{\Pi}}, \\ \pi_{\text{нас}} &= \frac{W_{\text{нас}}}{W_{\Pi}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.65)$$

где W_{Π} , W , $W_{\text{нас}}$ – энергопотребление соответственно полива (общее энергопотребление), системы энергоснабжения дождевальной машины и насоса водоподдачи, кВт·ч.

Энергопотребление электродвигателя насоса водоподдачи определяется потребляемой мощностью насоса и временем его работы. Изменение диаметра приводит к увеличению продолжительности работы, так как ДМ должна выполнить

условие поливной нормы. Однако из практических наблюдений продолжительность работы насоса изменится незначительно, поэтому примем продолжительность работы одинаковой для сравниваемых вариантов. Тогда (4.63) запишем для изменения энергопотребления:

$$\Delta W_{\text{нас}} = \frac{b' + \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} - 1. \quad (4.66)$$

Подставим в (4.64) выражения (4.66) и (4.50):

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{п}} = & \pi_{\text{нас}} \left[1 - \frac{b' + \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} \right] + \\ & + \pi_{\text{дм}} \left[1 - \frac{\left[un \left(\frac{1 + un}{2} \right) + n(1 - u)(1 - \Delta P'') \left(\frac{un + 1 + n}{2} \right) \right]}{n \left[\frac{1 + n}{2} \right]} \right]. \end{aligned} \quad (4.67)$$

Анализируя полученное выражение (4.67), определим, что коэффициенты u и a' характеризуют отношение длины (количество секций) с большим диаметром d_1 к общей длине (общему числу секций n) водораспределительного трубопровода ДМ. Примем условие, что изменение диаметра выполняется посекционно, т. е. в месте перехода опорных тележек. Обозначим эти коэффициенты:

$$u = a' = a''. \quad (4.68)$$

Доля снижения нагрузки электропривода $\Delta P''$ опорных тележек, несущих водораспределительный трубопровод ДМ меньшего диаметра, зависит от величины Δd , начального диаметра d_1 , толщины стенки трубы, а также от длины трубопровода секции:

$$\Delta P'' = 1 - \frac{b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d_1 (B - G) [1 - \Delta d] + G \frac{d_1^2}{4} (1 - \Delta d)^2 + P_{\text{во}}}{b_{\text{ст}}^2 (G - B) + b_{\text{ст}} d_1 (B - G) + G \frac{d_1^2}{4} + P_{\text{во}}}. \quad (4.69)$$

Изобразим данную зависимость (рисунок 4.19).

По рисунку 4.19 видно, что данная зависимость имеет линейный характер на малом промежутке изменения диаметра (на рисунке 4.19 – пунктирная линия).

На изменение нагрузки электропривода для опорной тележки одной секции незначительно влияют длина секции, а также начальный диаметр d_1 .

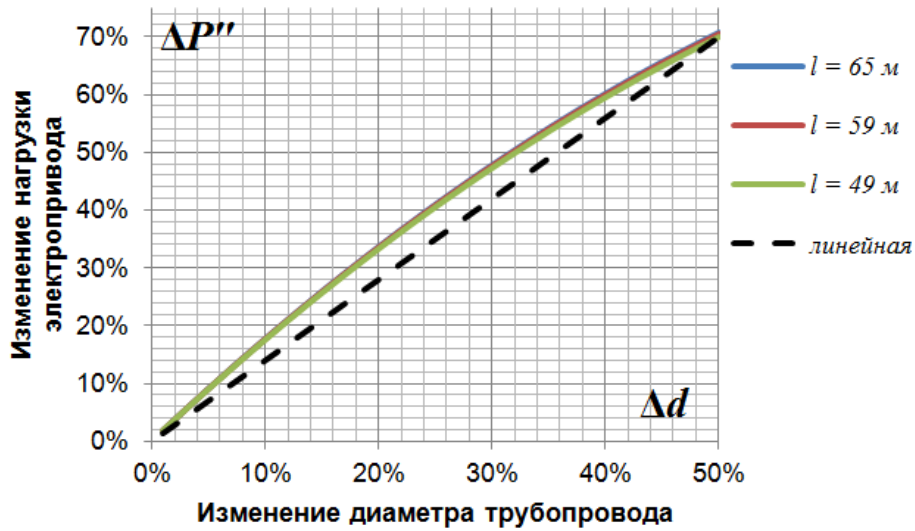


Рисунок 4.19 – Зависимость изменения нагрузки электропривода от изменения диаметра Δd водораспределительного трубопровода ДМ начальным диаметром $d_1 = 219$ мм

Для дальнейшего исследования выражения (4.67) примем допущение, что изменение нагрузки электропривода линейно зависит от изменения диаметра трубопровода секции, тогда с учетом преобразований выражение (4.67) примет вид:

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{нас}} \left[1 - \frac{b' + \left(\frac{a''(1 - \Delta d) + (1 - a'')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} \right] + \quad (4.70)$$

$$+ \pi_{\text{ДМ}} \left[1 - \frac{\left[a'' \left(\frac{1 + a''n}{2} \right) + (1 - a'')(1 - 1,4\Delta d) \left(\frac{a''n + 1 + n}{2} \right) \right]}{\left[\frac{1 + n}{2} \right]} \right].$$

Приняв ряд ограничений по напору, подаче насоса, зависимости изменения нагрузки электропривода, определим оптимальное значение доли снижения диаметра водораспределительного трубопровода $\Delta d_{\text{опт}}$. Для этого продифференцируем по $d\Delta d$ выражение (4.70):

$$\Delta d_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{\frac{\pi_{\text{нас}} a'' \left(\frac{1+n}{2} \right)}{1,4\pi_{\text{ДМ}} (1-a'') \left(\frac{a''n+n+1}{2} \right) (b'+1)}}. \quad (4.71)$$

Тогда доля изменения (снижения) общего энергопотребления полива примет вид, изображенный на рисунке 4.20.

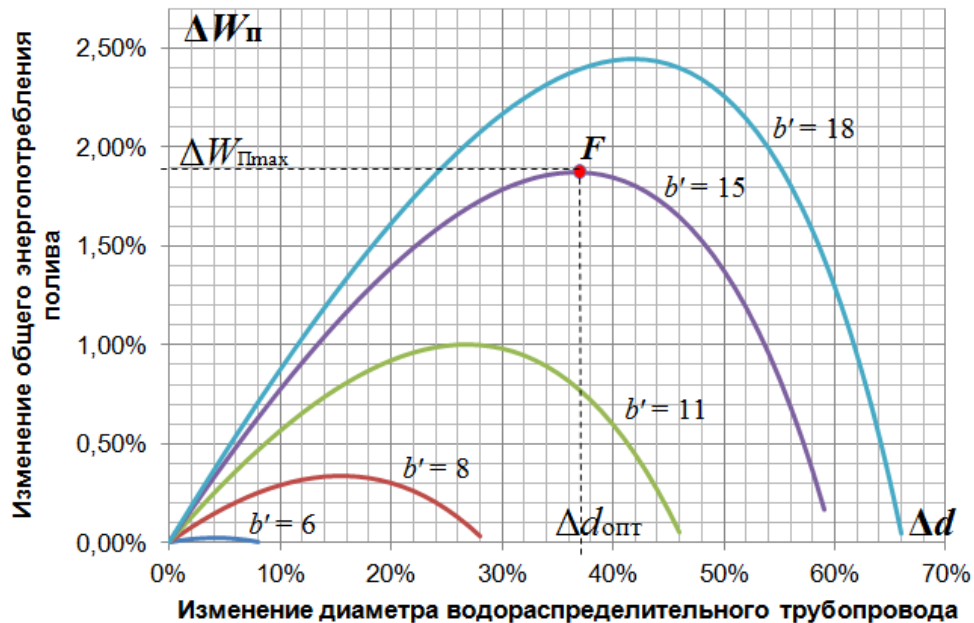


Рисунок 4.20 – Зависимость изменения доли энергопотребления полива дождевальными машинами кругового действия при изменении диаметра водораспределительного трубопровода при условии: $n = 10$; $a'' = 0,5$; $\pi_{\text{нас}} = 0,9$; $\pi_{\text{ДМ}} = 0,1$

Энергопотребление полива складывается из слагаемых энергопотреблений насоса водоподачи и системы энергоснабжения ДМ на водораспределение. При изменении (уменьшении) диаметра водораспределительного трубопровода на величину Δd , начиная с середины ($a'' = 0,5$) для дождевальной машины, состоящей из 10 секций ($n = 10$), увеличивается нагрузка на электродвигатель насоса водоподачи, но в то же время снижается нагрузка на электропривод опорных тележек. Если же дождевальная машина расположена на значительном расстоянии от водоема (насоса водоподачи) так, что при той же подаче насоса сумма статического напора и потерь на трение водоподводящего трубопровода будет в 15 и более раз больше потерь на трение водораспределительного трубопровода ДМ ($b' = 15$, фиолетовая линия рисунка 4.20), то при снижении диаметра до оптимального значения ($\Delta d_{\text{опт}} = 37\%$) находим точку F на рисунке 4.20, которая соответствует мак-

симальному снижению общего энергопотребления полива на 1,9 % в том случае, когда энергопотребление насоса водоподачи от общего энергопотребления составляет 90 % ($\pi_{\text{нас}} = 0,9$).

Если же дождевальная машина, имея те же характеристики, находится вблизи водоема (насоса водоподачи) так, что при той же подаче насоса сумма статического напора и потерь на трение водоподводящего трубопровода будет в 6 раз больше потерь на трение водораспределительного трубопровода ДМ ($b' = 6$, синяя линия рисунка 4.20), то при снижении диаметра на 5–10 % общее энергопотребление в целом не изменится.

Таким образом, на основе данного исследования видно, что снижением диаметра водораспределительного трубопровода дождевальной машины добиться снижения общего энергопотребления полива можно, когда ДМ располагается на значительном расстоянии от насоса водоподачи или на местности со значительным перепадом рельефа. Повысить энергетическую эффективность полива изменением диаметра можно для дождевальных машин, эксплуатируемых в тяжелых условиях (высокая доля энергопотребления электроприводов, значительная удаленность от насоса водоподачи, высокий перепад рельефа).

*Изменение нагрузки электропривода секции дождевальной машины
за счет изменения параметров колес опорной тележки*

По разным причинам перемещение трубопровода может быть заблокировано, например, пробуксовкой колес из-за попадания в яму или лужу. Тогда ДМ оказывается в неподвижном состоянии, а дождеобразующие устройства заливают одну полосу. В этом случае полив становится неэффективным. Поэтому производители стараются обеспечить движение при всех возможных условиях эксплуатации, используя все пути совершенствования параметров движителей, в качестве которых могут быть колеса, гусеничный ход или шагающий механизм. Чаще всего встречаются дождевальные машины с жесткими колесами и колесами на пневматических шинах [104, 105, 116, 147–152].

Форма колес опорной тележки как рабочий орган электропривода, а также их сцепление с грунтом влияют на потребление энергии. Предварительный анализ

показывает, что изменение параметров колес позволит снизить нагрузку на электропривод при соблюдении условий выполнения движения. Для этого необходимо выделить основные факторы, которые существенно влияют на мощность, потребляемую электродвигателем, и учесть условия выполнения движения.

Основным условием движения при сцеплении колес с грунтом, согласно [115, 169, 190, 237, 241, 289, 298], является соотношение силы сопротивления качению $\vec{F}_{СК}$ в точке взаимодействия колес с грунтом и силы трения скольжения $\vec{F}_{ТрСК}$:

$$\vec{F}_{СК} < \vec{F}_{ЭП} < \vec{F}_{ТрСК}, \quad (4.72)$$

где $\vec{F}_{ЭП}$ – сила, создаваемая электроприводом в точке взаимодействия колес с грунтом, Н.

Из условия (4.72) следует, что движение – качение колес начинается тогда, когда сила $\vec{F}_{ЭП}$, создаваемая электроприводом, больше силы сопротивления качению. В данном случае качение происходит без проскальзывания. Также сила, создаваемая электроприводом, должна быть меньше силы трения скольжения, иначе качение будет происходить с некоторым проскальзыванием. Главным условием качения является то, чтобы сила сопротивления качению была меньше силы трения скольжения [190, 241]. При этом для электропривода основной характеристикой является момент $M_{дв}$, создаваемый на валу электродвигателя, который можно выразить через радиус колеса:

$$\left. \begin{aligned} F_{ЭП} &= \frac{M_{ЭП}}{r}; \\ M_{ЭП} &= M_{дв} i \eta_{дв} \eta_{пер} \end{aligned} \right\}, \quad (4.73)$$

где $M_{ЭП}$ – момент, создаваемый электроприводом в точке взаимодействия сил (колес с грунтом), Н·м.

Силы в выражении (4.72) связаны с весом секции дождевальная машины через коэффициенты, которые характеризуют условия выполнения качения:

$$\frac{m_{РТ} g \delta}{r} < \frac{M_{дв}}{r} < m_{РТ} g \mu, \quad (4.74)$$

где δ – плечо момента трения качения, м; μ – коэффициент трения скольжения.

Изобразим эти силы на рисунке 4.21 для одного колеса опорной тележки, рассматривая колесо с пневматической шиной.

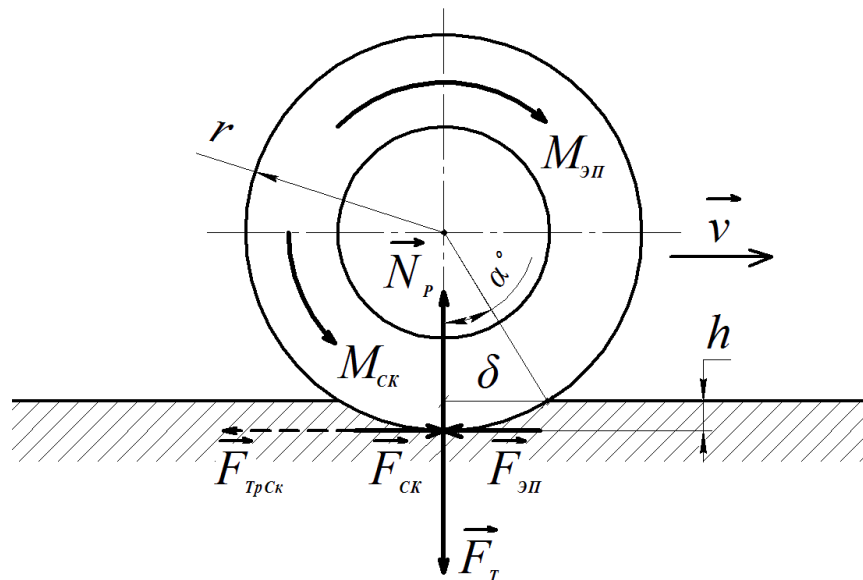


Рисунок 4.21 – Распределение сил и моментов выполнения качения колеса: N_p – сила реакции опоры, Н; F_T – сила тяжести, Н; $M_{СК}$ – момент сопротивления качению, Н·м; h – высота перепада неровностей грунта (высота колеи), м

В реальных условиях эксплуатации дождевальная машина колеса могут находиться в различных условиях сцепления с грунтом (сила сцепления, сила сопротивления качению и сила трения покоя численно будут равны друг другу [241]). Например, на влажном грунте коэффициент трения будет ниже, чем на сухом (таблица 4.1) [115, 169, 190, 289, 241, 237, 298]. Тогда неравенство (4.72) может быть нарушено, и качение колес не будет выполняться. В этом случае будет происходить скольжение на месте без поступательного движения.

Таблица 4.1 – Коэффициенты трения резиновой шины колеса при различной влажности грунта

| Грунт | Влажность по массе, % | Коэффициент трения |
|---------|-----------------------|--------------------|
| Сухой | до 3 | 0,7...0,9 |
| Влажный | до 50 | 0,4...0,6 |
| Сырой | 100 и выше (лужа) | 0,2...0,3 |

Для дождевальной машины необходимо рассматривать наихудший вариант влажности грунта, поскольку основной функцией является полив дождеванием культурных растений, что само по себе увлажняет верхний слой почвы до 100 %. Поэтому в дальнейшем примем к рассмотрению только этот случай.

В динамике колеса проявляются параметры, которые также оказывают влияние на мощность двигателя. Из теории динамики колеса [174, 190, 241] известны: угол бокового увода, угол развала, относительное продольное проскаль-

зывание, относительное поперечное проскальзывание, вертикальная деформация шины, скорость вертикальной деформации, радиус ненагруженного колеса, коэффициент жесткости шины в вертикальном положении, коэффициент жесткости шины в продольном и поперечном направлениях, нагрузка на шину, доля вертикального демпфирования от критического, коэффициент трения при нулевом крене, коэффициент трения при полном скольжении шины и т. п. Однако, принимая во внимание малую скорость вращения колес дождевальная машины с частотой $\omega_k \ll 1$ рад/с без регулирования [116, 231, 345, 349], значительное количество этих параметров будут равны нулю, а некоторые будут иметь небольшие значения, которыми в данном исследовании можно пренебречь.

С учетом установленных допущений и принятых положений, а также особенностей габаритных размеров секции дождевальной машины с общей рабочей массой 2000...2500 кг следует рассматривать специальные пневматические шины для сельскохозяйственных машин [91], из состава параметров которых существенное влияние на мощность двигателя оказывают:

- плечо момента трения качения δ , м;
- радиус колеса r , м;
- ширина колес l_k , м;
- глубина протектора пневматической шины f , м (рисунок 4.22);
- давление воздуха в шине $p_{ш}$, Па.



а



б

Рисунок 4.22 – Пневматическая шина колеса секции дождевальной машины:
а – общий вид; б – глубина протекторного рисунка, см

Для обоснования оптимальных параметров колес опорной тележки секции необходимо также рассмотреть условия, в которых их эксплуатируют. Нагрузка на колеса определяется массой всех элементов секции. По этим данным рассчитывают количество колес, т. е. количество точек распределения веса для обеспечения устойчивости и безопасности, и по [91, 174] определяют диапазон типоразмеров шин.

При поливе поверхность грунта увлажняется на слой средней интенсивности дождевания $i_{\text{Дср}}$ (мм/мин) [187]. Как правило, дождем заливается такой слой, который рассчитан по поливной норме $m_{\text{пн}}$. Это приводит к снижению коэффициента трения скольжения, поэтому возрастает вероятность проскальзывания колес и, следовательно, невыполнения поступательного движения и полива поливной площади, обусловленной габаритами машины.

Перемещение секций дождевальной машины происходит по неровной поверхности грунта, у которого возможен резкий перепад высотой до 0,2 м. Для того, чтобы продолжать движение, радиус колес должен соответствовать такому перепаду.

Из указанных параметров колес напрямую на мощность электродвигателя влияют только два из них (выражение (4.74)) – радиус и плечо момента трения качения, а такие параметры, как ширина колес, глубина протектора и давление в шине влияют косвенно, через плечо момента трения качения и радиус колеса.

Потребляемая мощность электродвигателя в составе электропривода будет минимальной тогда, когда левая часть условия (4.72) также будет минимальной.

Согласно выражению (4.74), при сыром грунте (см. таблицу 4.1, $\mu = 0,2$) условие качения:

$$\frac{\delta}{r} < 0,2. \quad (4.75)$$

Тогда из рисунка 4.21:

$$\delta = r \sin \alpha, \quad (4.76)$$

или

$$\sin \alpha < 0,2;$$

$$\alpha < 12^\circ.$$

Длина дуги сегмента колеса, заключенного в угле 2α , настолько мала, что обеспечить данное соотношение плеча и радиуса довольно сложно. Сырой грунт имеет плотность значительно ниже плотности сухого грунта. Также в этом идеальном случае не учитывается величина перепада неровностей грунта h , а давление в шине принято нормальным. Поэтому рассмотрим данную зависимость в другом варианте.

Примем допущение, что сырой грунт с коэффициентом трения $\mu = 0,2$ находится в слое средней интенсивности дождевания 6 мм/мин, а за промежуток времени перемещения колеса выезжает из двойного слоя, т. е. 12 мм. Тогда под этим слоем находится сухой грунт с коэффициентом трения 0,7. Значение отношения плеча к радиусу в выражении (4.73) можно изменить, учитывая глубину протектора на шине, что должно соответствовать условию:

$$f > i_{\text{дер}}. \quad (4.77)$$

Давление воздуха ограничено условиями эксплуатации шины. В [91] указаны максимальные значения давления для шин. При сниженном давлении внутри шины плечо контакта будет несколько больше, что в результате приведет к увеличению нагрузки электропривода.

Как известно из классической динамики [20, 60], коэффициент трения не зависит от площади контакта двух взаимодействующих тел, а лишь от силы их взаимодействия. Поэтому при изменении ширины колеса коэффициент трения изменяться не будет. Однако сила давления колес будет распределяться при большей площади контакта, что в свою очередь обеспечит уменьшение плеча момента трения качения и, соответственно, снижение нагрузки электропривода.

Для обоснования зависимости момента трения от ширины колеса воспользуемся моделью линейной вязкоупругости Максвелла [169, 171, 280]. Деформация грунта при давлении шины в течение большого промежутка времени приведет к погружению части колеса в грунт объемом V_k :

$$\frac{dV_k}{dt} = \frac{dS_k}{dt} l_k, \quad (4.78)$$

где S_k – площадь сегмента погруженного колеса, м^2 ; l_k – ширина колеса, м.

При прочих равных условиях (нагрузке на колеса, давлении воздуха внутри шин, влажности грунта, вида грунта и т. п.) изменение ширины колеса приведет к изменению площади его сегмента, но объем погруженной части колеса будет неизменным. Примем допущение, что при увеличении ширины колес площадь сегмента колеса, погруженного в грунт, будет уменьшаться по принципу (давление внутри шины также не изменяется и равно номинальному):

$$S_{к1}l_{к1} = S_{к2}l_{к2} = \text{const.} \quad (4.79)$$

Согласно теории [54, 284, 302], определим зависимость изменения ширины колес и плеча момента трения качения:

$$\frac{l_{к2}}{l_{к1}} = \frac{\frac{1}{2}r^2 \left(2 \arccos \left(1 - \frac{r - \sqrt{r^2 - \delta_1^2}}{r} \right) - \sin \left(2 \arccos \left(1 - \frac{r - \sqrt{r^2 - \delta_1^2}}{r} \right) \right) \right)}{\frac{1}{2}r^2 \left(2 \arccos \left(1 - \frac{r - \sqrt{r^2 - \delta_2^2}}{r} \right) - \sin \left(2 \arccos \left(1 - \frac{r - \sqrt{r^2 - \delta_2^2}}{r} \right) \right) \right)}, \quad (4.80)$$

где $2 \arccos \left(1 - \frac{r - \sqrt{r^2 - \delta_{1,2}^2}}{r} \right)$ – угол дуги сегмента колес соответственно при ширине

$l_{к1}$ и $l_{к2}$, рад.

Рассмотрим зависимость ширины колеса от плеча момента сопротивления качению на графиках (рисунки 4.23 и 4.24).

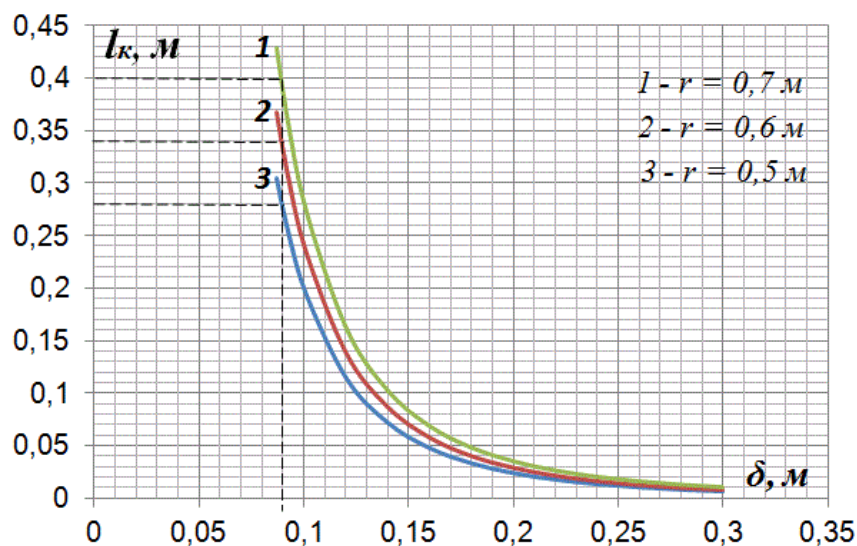


Рисунок 4.23 – Зависимость изменения плеча момента качения от ширины колеса при различных радиусах колес

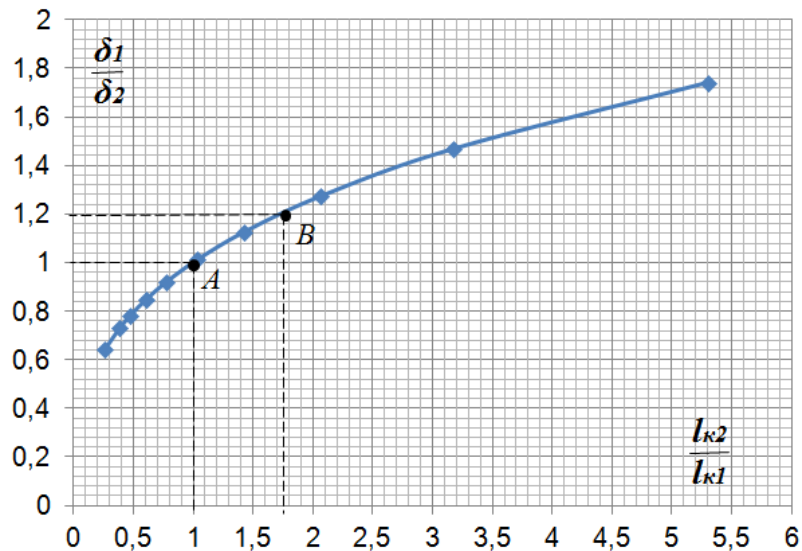


Рисунок 4.24 – Зависимость изменения отношений ширины колес и плеч момента качения при радиусе колеса $r = 0,5$ м

Исключая влияние давления внутри шины и считая колесо абсолютно упругим, из рисунка 4.24 видно, что при увеличении ширины колеса (например, в 1,75 раза) плечо момента качения снижается в 1,2 раза (точка *B*).

На основе полученной зависимости (4.80) можно предположить, что, принимая ширину колес в 2–3 раза больше стандартной типоразмерной шины [91], можно в 1,3–1,5 раза уменьшить размер плеча момента качения и, следовательно, в 1,3–1,5 раза снизить нагрузку электропривода. Однако на практике подбор ширины колес ограничивается выбором шин и дисков стандартных размеров [91], что приводит к увеличению площади испорченной культуры. Ширина колеса, согласно [91, 174], связана с радиусом, поэтому изменение ширины колеса с изменением радиуса приобретает практическую и теоретическую значимость. В этом случае необходимо рассмотреть минимальное значение радиуса колеса.

Радиус колеса, согласно [32, 113, 115, 116, 205, 315, 345, 349], оказывает существенное влияние на потребляемую двигателем мощность и в целом на характеристики качения. Также радиус колеса должен обеспечивать качение с высотой перепада неровности грунта h (м) и коэффициентом трения μ , который также определяет значение плеча момента сопротивления качению δ (м). Согласно теории [174], минимальный радиус, обеспечивающий качение колес, определяется исходя из условия (4.72). При малом радиусе колес (меньше минимального) условие (4.72) выполняться не будет, так как сила давления будет настолько погру-

жать колеса в грунт, что сила скольжения будет меньше силы качения колес. Колеса будут буксовать. Вместе с этим радиус должен компенсировать различную высоту перепада грунта на пути поступательного движения колеса. Поэтому важно оценить минимальный радиус колес при выполнении условия (4.72) и при различной высоте перепада грунта на пути поступательного движения.

Рассмотрим различную высоту перепада грунта при одном и том же радиусе колес (рисунок 4.25).

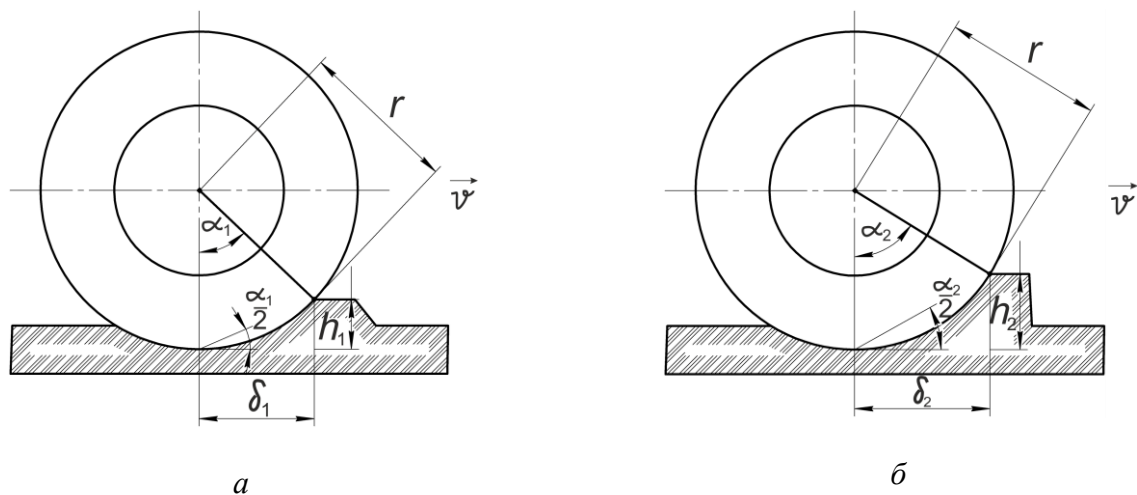


Рисунок 4.25 – Изменение плеча момента качения от высоты перепада грунта: а – h_1 ; б – h_2

Как видно из рисунка 4.25, угол $\frac{\alpha}{2}$ изменяется в зависимости от изменения высоты перепада грунта h , а тангенс этого угла показывает отношение h к δ :

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{\delta}. \quad (4.81)$$

Оптимальный угол $\frac{\alpha}{2}$ и отношение h к δ будут определяться той границей, когда еще выполняется условие качения колеса (4.72), а граница этого условия:

$$\vec{F}_{\text{СК}} = \vec{F}_{\text{ТрСК}}. \quad (4.82)$$

Тогда минимальный радиус колеса с учетом выражений (4.76) и (4.81):

$$\left. \begin{aligned} r_{\min} &= \frac{h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sin \alpha} = \frac{h}{1 - \cos \alpha}, \\ h &\neq 0, \alpha \neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.83)$$

Из рисунка 4.26 видно, что при максимальной высоте перепада $h = 0,15$ м и при высоком коэффициенте сцепления, который определяет границу равнодействия сил сопротивления качению и трения скольжения в точке окружности колеса, образуя угол с вертикалью $\alpha = 45^\circ$, минимальный радиус колеса, обеспечивающий качение, – $r = 0,51$ м. Однако при увлажнении почвы коэффициент трения уменьшится, что приведет к снижению силы трения скольжения и к сдвигу границы равнодействия сил условия (4.72). Тогда при угле $\alpha = 34^\circ$ и высоте перепада грунта $h = 0,15$ м минимальный радиус колеса, обеспечивающий качение, – $r = 0,88$ м.

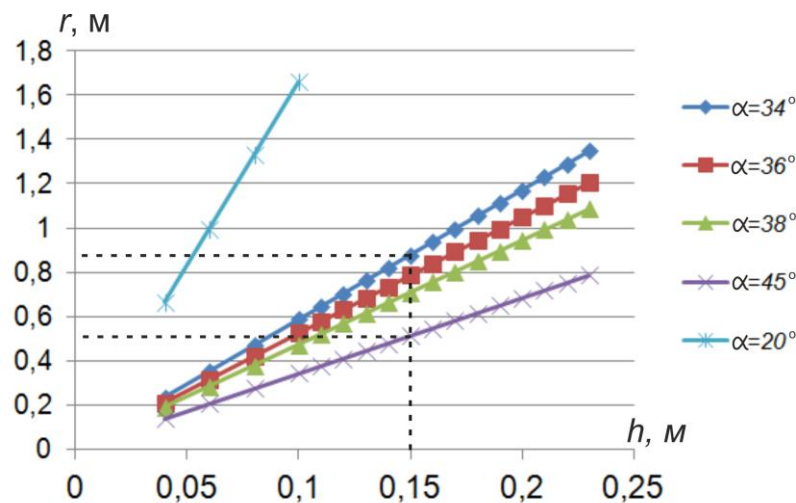


Рисунок 4.26 – Изменение радиуса колеса в зависимости от высоты перепада грунта при качении

Минимальное значение радиуса колес определяет минимальное значение мощности на валу электродвигателя при условии выполнения качения колес. Тогда, подставляя выражение (4.83) в выражение (4.10), после преобразования получим:

$$P_{\text{дв-мин}} = \frac{hF_{\text{СК}}\omega_{\text{дв}}}{(1 - \cos \alpha)i\eta_{\text{дв}}\eta_{\text{пер}}}. \quad (4.84)$$

Таким образом, обобщая полученные данные, можно сделать вывод о том, что дождевальная машина эксплуатируется в особых условиях взаимодействия колес опорных тележек с поливным грунтом. С учетом малых скоростей перемещения машины рассматривать классическую теорию динамики колес некорректно. Однако размеры колес, их условия сцепления с грунтом и условия качения в комплексе формируют диапазон нагрузки электропривода. Из всех известных по-

казателей существенное влияние на потребляемую мощность электродвигателя в составе электропривода оказывают радиус колеса, размер плеча момента сопротивления качению и высота перепада грунта. Выбор оптимальных параметров колес по критериям обеспечения качения и минимальной требуемой мощности на валу электродвигателя позволит снизить общее энергопотребление дождевальной машины. Установлено, что при увеличении ширины колес в 1,75 раза нагрузка электропривода снижается на 16,0–17,0 %.

Также установлена зависимость радиуса колес от высоты перепада грунта. Минимальное значение радиуса соответствует минимальному потреблению энергии. На основе полученных данных установлен диапазон снижения фактического радиуса колес до минимального значения при прочих равных условиях – 5,1–12,4 %. Тогда комплексное снижение нагрузки электропривода составит 21,1–29,4 %.

С учетом полученных теоретических данных рассмотрим изменение параметров колеса для дождевальной машины кругового действия при прочих равных условиях (нагрузка, длина секции, диаметр трубопровода, высота перепада грунта и т. п.). В базовом варианте машина имеет два колеса с пневматическими шинами специального исполнения (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Параметры пневматических шин ДМ

| Размер шины | Модель шины | Наружный диаметр, мм | Ширина шины, мм |
|-------------|-------------|----------------------|-----------------|
| 380/70 R28 | VL 44 | 1190±18 | 378 |

Для снижения нагрузки электропривода и обеспечения качения в тех же условиях, при высоте перепада грунта 150 мм минимальный радиус составляет 522 мм с глубиной протекторного рисунка 36 мм. В идеальном случае это приведет к снижению нагрузки на 12,2 % при той же ширине шины. Но ближайший стандартный размер шины диаметром 1054±17 мм ($r = 527$ мм) ограничивает снижение мощности до 11,4 % [91]. Однако у данного стандартного размера шины глубина протекторного рисунка на 2 мм меньше, что может повлиять на проходимость колес. Данное положение требует дальнейшего исследования.

Увеличения проходимости колес и снижения мощности можно добиться, увеличивая ширину шины с 378 до 680 мм, или на 16,66 %. Ближайшие к 680 мм значения стандартной ширины – 540 и 775 мм. Соответственно они могут обеспе-

чить снижение энергопотребления водораспределения на 8,6 и 17,3 %. Данный способ позволяет снизить общее энергопотребление полива на 0,34–1,21 %.

Сравнение нагрузок электропривода опорной тележки на жестких колесах и на колесах с пневматическими шинами

Самыми распространенными являются колеса с пневматическими шинами. Их используют в первую очередь для повышения коэффициента сцепления с грунтом и выполнения условия (4.72). Также применяют жесткие колеса [5, 309]. Если рассмотреть действие этих колес с позиции энергопотребления, считая сцепление одинаковым, то их нагрузочные характеристики будут различными.

Оценим и сравним нагрузки электропривода при использовании пневматических и жестких колес, опираясь на теорию качения деформируемого и жесткого колеса [83, 96, 169, 171, 174, 181, 190, 241, 280, 289]. На момент качения жесткого колеса при малых значениях угловой скорости ($\omega \ll 1$ рад/с) меньше всего влияют внутренние силы, если сравнивать с колесом на пневматической шине. Другими словами, рассматриваются две различные системы [174, 241]: движение жесткого колеса по деформируемой поверхности и движение деформируемого колеса по деформируемой поверхности.

Нагрузка электропривода опорной тележки жесткого колеса будет определяться по выражению (4.10), а на нагрузку колеса с пневматической шиной будет влиять действие кинематических сил деформации. Рассмотрим действие этих сил на рисунке 4.27.

Деформируемое колесо испытывает нормальную, тангенциальную и поперечную деформации [174]. Движение ДМ по окружности вызывает действие всех деформаций даже при малых скоростях. Нормальная деформация пропорциональна давлению воздуха в шине и характеризуется коэффициентом жесткости λ_n , который также зависит от свободного радиуса колеса, радиуса сечения шины, материала, типа корда и т. п. ($\lambda_n = 80 \dots 340$ кН/м). Тангенциальная деформация определяется углом закрутки шины φ_0 [174] и характеризуется угловой жесткостью λ_t , что увеличивает плечо момента трения качения δ в начальный момент времени

действия $M_{дв}$. Боковая деформация характеризуется углом бокового увода ψ_y и также коэффициентом угловой жесткости λ_{ψ} .

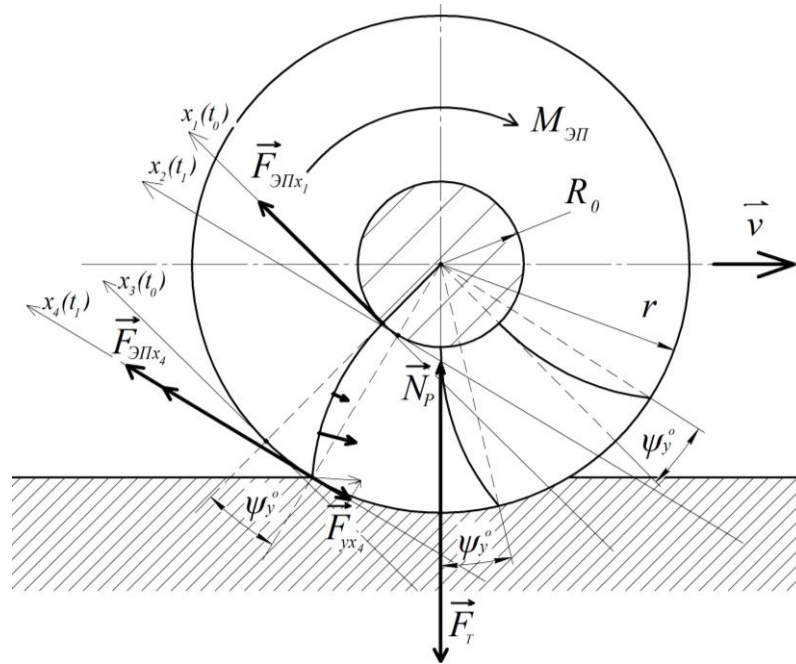


Рисунок 4.27 – Вид деформации колеса на пневматической шине: R_0 – радиус обода, м; $F_{дв}$ – сила действия крутящего момента электропривода, Н; \vec{v} – направление скорости движения, м/с; F_T – сила тяжести, Н; N_P – сила реакции опоры, Н; F_{yx4} – проекция силы упругости на ось $0x_4$, Н

Совокупное действие перечисленных деформаций приводит к появлению действия силы упругости F_y в точке (или пятне контакта) взаимодействия колес с поверхностью грунта. При этом значение дополнительной силы упругости, возникающей в момент движения, пропорционально отношению профиля пневматической шины и радиуса диска колеса.

С учетом этих положений мощность электродвигателя электропривода опорной тележки с колесами на пневматических шинах $P_{двПШ}$ и с жесткими колесами $P_{двЖК}$:

$$P_{двПШ} = \frac{(F_{СК} + F_y)r(1-\sigma)\omega_{дв}}{i\eta_{дв}\eta_{пер}}; \quad (4.85)$$

$$P_{двЖК} = \frac{F_{СК}r\omega_{дв}}{i\eta_{дв}\eta_{пер}}, \quad (4.86)$$

где σ – коэффициент проскальзывания (буксирования) [174], на который уменьшается свободный радиус колеса; F_y – сила упругости действия нормальной, тангенциальной и поперечной деформаций шины колеса, Н.

Возникающую силу упругости можно определить согласно [174]:

$$F_y = k_{\text{корд}} F_T \sqrt[3]{\frac{x_{\text{пш}}}{2r}}, \quad (4.87)$$

или

$$F_y = \mu_{\text{пш}} F_T, \quad (4.88)$$

где $\mu_{\text{пш}}$ – коэффициент сопротивления качению шины; $k_{\text{корд}}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от профиля, типа корда шины ($k = 0,1 \dots 0,8$); $x_{\text{пш}}$ – средняя деформация шины (при оптимальном давлении воздуха в ней), определяющая гистерезисные потери сжатия и восстановления, м; F_T – сила тяжести, Н.

Рассмотрим зависимость мощности на валу электропривода с колесами на пневматических шинах и с жесткими колесами с одинаковым нормальным радиусом и одинаковой высотой протектора при прочих равных условиях деформации поверхности грунта (рисунки 4.28 и 4.29).

Доля превышения мощности на валу электродвигателя с колесами на пневматических шинах относительно электропривода с жесткими колесами:

$$\Delta P^m = \frac{P_{\text{двпш}} - P_{\text{двжк}}}{P_{\text{двжк}}} = \frac{(F_{\text{СК}} + F_y)(1 - \sigma) - F_{\text{СК}}}{F_{\text{СК}}} = \frac{\left(\mu + k_{\text{корд}} \sqrt[3]{\frac{x_{\text{пш}}}{2r}} \right) (1 - \sigma)}{\mu}. \quad (4.89)$$

Таким образом, изменение параметров колес, таких, как свободный радиус, ширина и характеристики пневматической шины, влияют на нагрузку электропривода. У электропривода на жестких колесах, выполненных из металла (например, колеса ДМ с гидроприводом «Фрегат» или более нового поколения типа Rainefine Plastic tire), мощность на валу на 1,25–5,87 % ниже, чем у колес на пневматических шинах с различными характеристиками жесткости материала, типа и слоев корда при одинаковом радиусе.

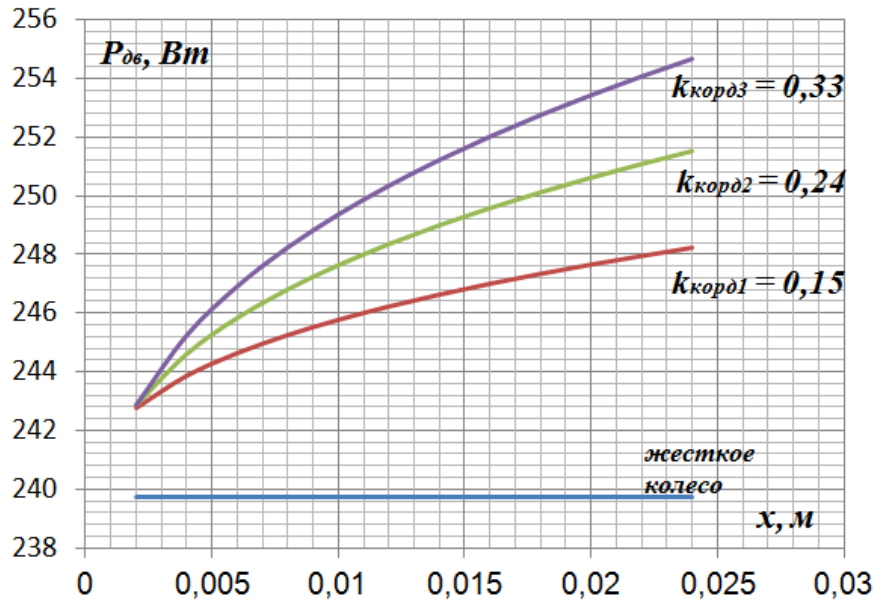


Рисунок 4.28 – Зависимость мощности на валу электродвигателя от типа колес с пневматическими шинами по сравнению с жестким колесом одного диаметра при коэффициентах пропорциональности $k_{корд1} = 0,15$; $k_{корд2} = 0,24$; $k_{корд3} = 0,33$

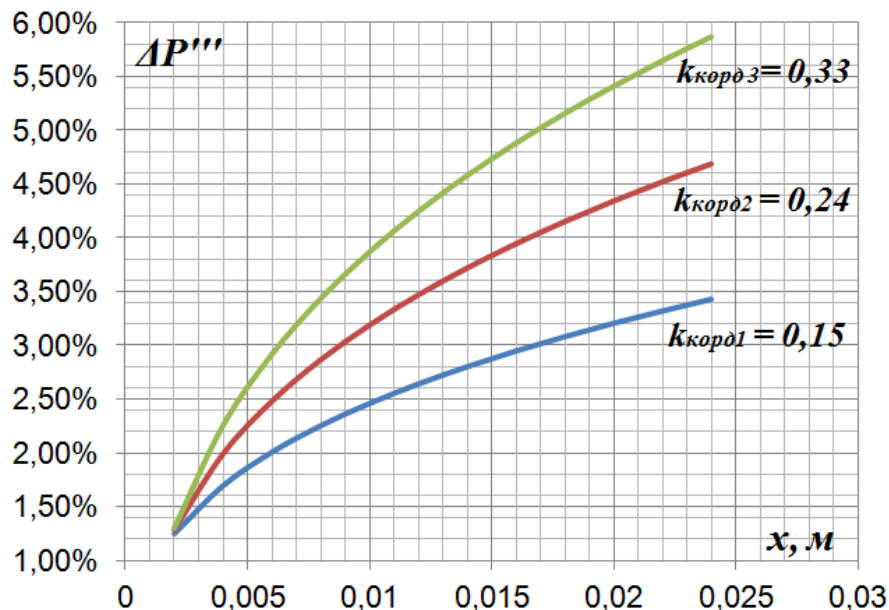


Рисунок 4.29 – Зависимость доли превышения нагрузки электропривода с колесами на пневматических шинах относительно электропривода с жесткими колесами одного диаметра при коэффициенте пропорциональности $k_{корд1} = 0,15$; $k_{корд2} = 0,24$; $k_{корд3} = 0,33$

Существенное влияние на деформацию пневматической шины оказывает давление воздуха внутри нее. В рассматриваемых условиях параметры деформируемой поверхности грунта принимали одинаковыми.

В совокупности рассматриваемые способы снижения нагрузки электропривода (минимальный радиус колеса, ширина колеса и тип движителя – жесткое ко-

лесо) по результатам теоретического исследования позволяют снизить энергопотребление водораспределения на 13,35–23,27 %, а общее энергопотребление полива на 0,53–1,62 %.

4.3 Обоснование аккумуляторного источника питания дождевальной машины кругового действия

Аккумуляторный источник питания ДМ является оптимальным при удаленности от централизованной системы электроснабжения $l_{\text{пт}} > 1000$ м, как показано в 3-й главе. При этом оснащение аккумуляторного питания возобновляемыми источниками (солнечными панелями или ветрогенераторами) на месте установки ДМ позволяет получать электроэнергию низкой стоимости. Для комбинированного источника питания наибольшую энергоэффективность имеет применение электродвигателей постоянного тока или индукторно-вентильных электродвигателей.

Использование аккумуляторного источника питания предусматривает комплектование электропривода двигателями постоянного тока, шаговыми или вентильными электродвигателями. Рассматриваемая система энергоснабжения ДМ исключает потери на передачу электроэнергии (см. таблицу 1.19.), так как аккумуляторную батарею можно располагать около электропривода.

Рассмотрим параметры аккумуляторного источника питания для энергообеспечения дождевальной машины, эксплуатируемой в условиях, оптимальных для таких источников питания.

Большинство электрифицированных дождевальных машин используют источники переменного синусоидального тока. Все электрооборудование, используемое в ДМ (электродвигатель, элементы системы управления и защиты), является оборудованием широкого применения, работающее на переменном токе.

Параметры источника питания, согласно [3, 13, 34, 199, 220, 305, 318], принимают по исходным данным электроприемников. Прежде всего это касается электродвигателя и системы автоматического управления. Например, для дождевальных машин 1-го и 2-го поколений использовали электродвигатели мощностью 35–75 кВт, которые были подключены к мощным генераторам переменного

тока или централизованной сети электроснабжения. Для такой электрической нагрузки использовать аккумуляторный источник питания было невозможно.

В дождевальных машинах 3-го и 4-го поколений используют электродвигатели мощностью в 40–50 раз меньше.

Развитие технологий производства аккумуляторных батарей и их широкое распространение в последние годы позволяют использовать их не только в качестве дополнительного источника, но и как основной отдельный источник питания. Это расширяет выбор электродвигателей постоянного тока, вентильных реактивных электродвигателей.

В настоящее время в пределах расчетной мощности современных транспортных систем и машин развитие технологий изготовления электрохимических источников постоянного тока открывает возможность использования таких источников для питания мобильных сельскохозяйственных машин [342, 343, 334, 16, 37, 85, 136, 211, 249, 319].

Типоразмерный ряд электродвигателей переменного тока превосходит типоразмерный ряд электродвигателей постоянного тока. Однако в настоящее время с развитием электротранспорта расширилось производство вентильных электродвигателей (ЭД) и электродвигателей постоянного тока мощностью от 0,003 до 5,5 кВт различного исполнения и модификаций совместно с редукторами [93, 205, 207].

Для автономных источников питания на постоянном токе целесообразно применять электродвигатели постоянного тока, вентильные электродвигатели с постоянными магнитами или вентильные реактивные электродвигатели, поскольку для ЭД переменного тока, работающего в системе питания постоянного тока, требуется дополнительный преобразователь – инвертор, а это приводит к дополнительным потерям энергии и снижению КПД системы.

Аккумуляторный источник питания применяют тогда, когда нецелесообразно использовать централизованный источник питания или переносной генератор, а также в случаях возможного совместного применения возобновляемых источников энергии.

Рассмотрим электропривод одной секции ДМ, выполненный с электродвигателем постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением от постоянных магнитов [205]. Примем, что механическая характеристика ДПТ схожа с механической характеристикой применяемых электродвигателей переменного тока.

В электрическую схему включено оборудование только одной секции. Рассмотрим параметры оборудования в схеме, в которой характеризуются (рисунок 4.30):

- электродвигатель – номинальной мощностью $P_{дв}$ (Вт), номинальным током $I_{дв}$ (А), номинальным напряжением на зажимах $U_{дв}$ (В), активным сопротивлением обмотки $R_{адв}$ (Ом), индуктивностью обмотки $L_{дв}$ (Гн), емкостью обмотки $C_{дв}$ (Ф);

- силовая сеть и сеть управления – длиной проводника $l_{пр}$ (м), сечением проводника $S_{пр}$ (мм²), удельным сопротивлением $\rho_{пр}$ ((Ом·мм²)/м), активным сопротивлением проводника $r_{пр}$ (Ом), индуктивностью проводника $L_{пр}$ (Гн), емкостью проводника $C_{пр}$ (Ф);

- источник питания (аккумуляторная батарея – АКБ) – чистой электродвижущей силой источника $E_{АКБ}$ (В), внутренним сопротивлением $r_{АКБ0}$ и $r_{АКБ1}$ (Ом), номинальным напряжением на зажимах $U_{АКБ}$ (В), номинальной электрической емкостью C_N (А·ч), внутренней индуктивностью потока заряженных частиц $L_{АКБ}$ (Гн), внутренней емкостью разряда $C_{АКБ1}$ (Ф) и релаксационной емкостью $C_{АКБ0}$ (Ф);

- устройства управления – номинальной мощностью $P_{уу}$ (Вт), номинальным током $I_{уу}$ (А), номинальным напряжением $U_{уу}$ (В), активным сопротивлением $R_{ауу}$ (Ом), индуктивностью $L_{уу}$ (Гн), емкостью устройства $C_{уу}$ (Ф).

Для описания зависимостей параметров такой системы составим полную электрическую схему.

Схема на рисунке 4.30 характеризует взаимосвязь элементов цепи и определяет возможные режимы работы рассматриваемой системы энергоснабжения. Основная цель данного исследования заключается в обеспечении энергией электропривода опорной тележки на протяжении полива орошаемой площади, т. е. необходимо обосновать параметры аккумуляторного источника питания для заданной продолжительности работы секции ДМ. Поэтому динамическими режимами (пус-

ковыми, коммутационными и т. п.) для АКБ можно пренебречь, а схему на рисунке 4.30 упростить. Для дальнейшего исследования примем схему на рисунке 4.31.

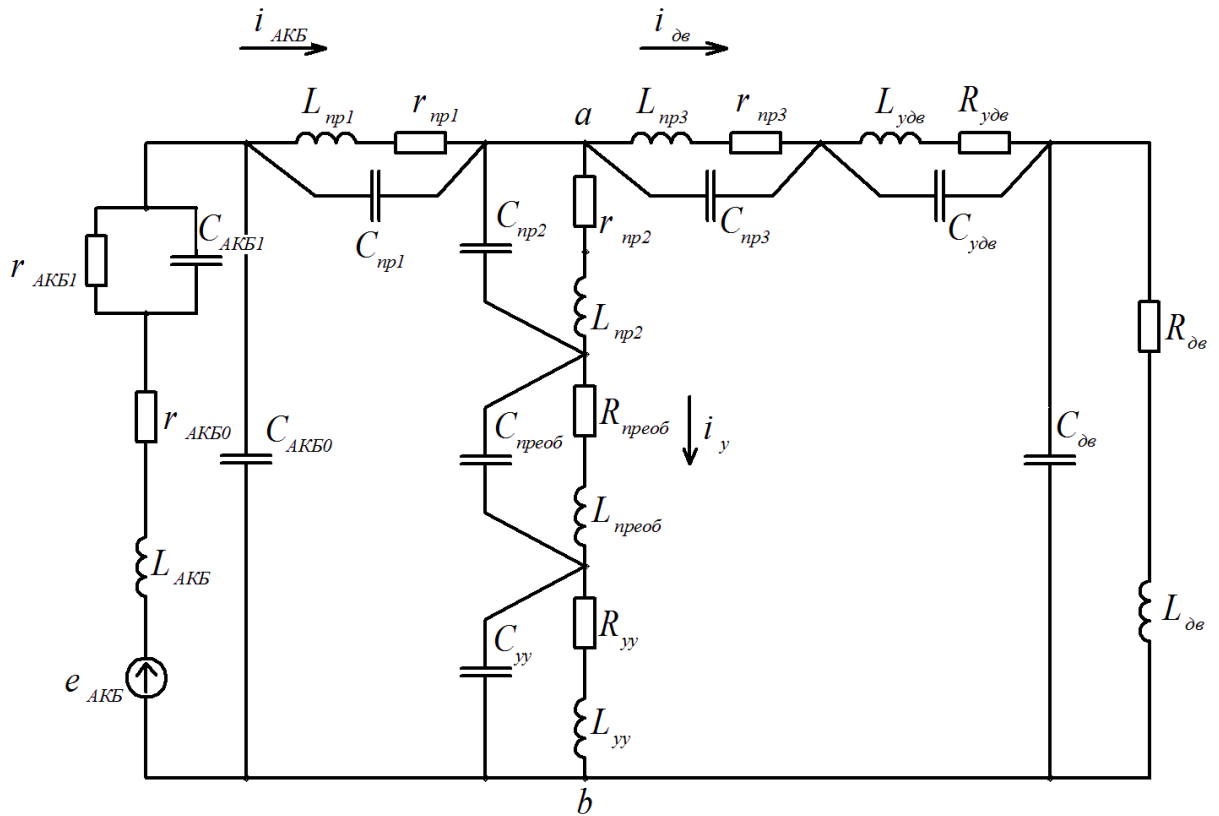


Рисунок 4.28 – Схема замещения цепи включения источника питания АКБ, устройств управления электродвигателем постоянного тока: $R_{преоб}$ (Ом) – активное сопротивление преобразователя; $L_{преоб}$ (Гн) – индуктивность преобразователя; $C_{преоб}$ (Ф) – емкость преобразователя; $R_{удв}$ (Ом) – активное сопротивление устройства управления двигателем, $L_{удв}$ (Гн) – индуктивность устройства управления двигателем, $C_{удв}$ (Ф) – емкость устройства управления двигателем

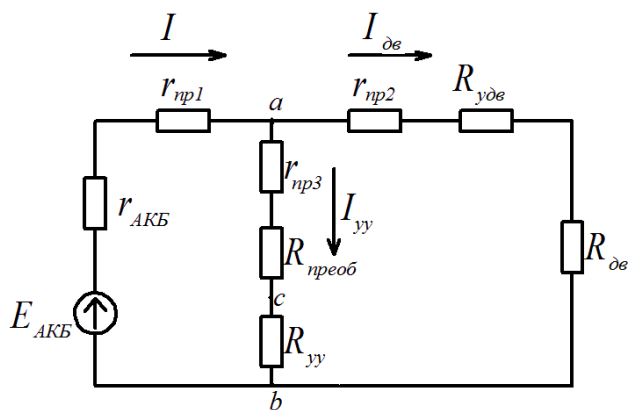


Рисунок 4.31 – Упрощенная схема замещения включения электродвигателя постоянного тока, устройства управления и аккумуляторной батареи

Преобразователь в цепи, обусловленный сопротивлением $R_{преоб}$, требуется для создания необходимого напряжения устройства управления в узлах c и b –

U_{cb} , если номинальные напряжения ДПТ и устройства управления (например, прибора синхронизации движения в линию ПСЛ) будут различны.

В рассматриваемом варианте следует использовать так называемую тяговую аккумуляторную батарею (ТАБ), которая обладает низким внутренним сопротивлением $R_{АКБ}$ и линейной степенью заряженности θ [6, 7, 154, 163, 249, 251, 253, 282, 269, 325, 337, 338, 342, 357]. Внешняя характеристика тяговой аккумуляторной батареи зависит от типа материала и особенностей протекания химической реакции [154, 337, 338]. Средняя внешняя характеристика ТАБ представлена на рисунке 4.32.

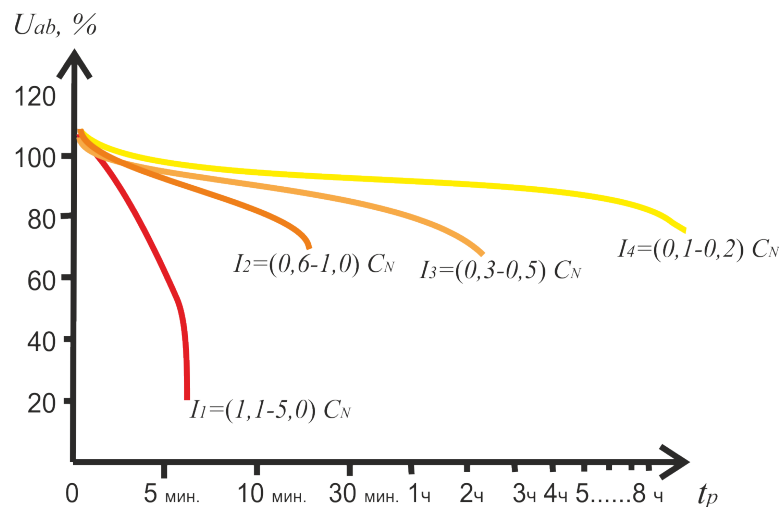


Рисунок 4.32 – Внешняя нагрузочная характеристика тяговой аккумуляторной батареи

В продолжительном режиме работы аккумуляторной батареи пусковыми и коммутационными составляющими можно пренебречь, так как промежуток времени этих режимов пренебрежимо мал и на расчетах параметров АКБ не отразится.

По внешней нагрузочной характеристике видно, что при выборе параметров элементов цепи необходимо ориентироваться на величину тока разряда не более чем $(0,1 \dots 0,2)C_N$, чтобы обеспечить продолжительность работы электропривода опорной тележки секции $t_p > 8$ ч.

Рассчитаем токи в ветвях, используя законы Кирхгофа [23, 53]:

$$I = I_{yy} + I_{дв}. \quad (4.90)$$

Напряжение на зажимах ab :

$$U_{ab} = E_{акб} - I(r_{акб} + r_{пр1}), \quad (4.91)$$

где $r_{\text{пр1}}$ – сопротивление проводника от АКБ до узла a , Ом,

или

$$U_{ab} = I_{\text{дв}}(R_{\text{дв}} + R_{\text{удв}} + r_{\text{пр2}}); \quad (4.92)$$

$$U_{ab} = I_{\text{yy}}(R_{\text{yy}} + R_{\text{пр}} + r_{\text{пр3}}). \quad (4.93)$$

Если расположить АКБ рядом с электроприводом (например, на А-образной раме опорной тележки), то сопротивлением проводников $r_{\text{пр1}}$, $r_{\text{пр2}}$, $r_{\text{пр3}}$ можно пренебречь, так как их величина будет пропорциональна величине удельного сопротивления материала (медного или алюминиевого проводника [23, 53, 343]).

Обозначим нагрузку на АКБ как $P_{\text{н}}$, которую определим по формуле:

$$P_{\text{н}} = I_{\text{дв}}^2 (R_{\text{дв}} + R_{\text{удв}} + r_{\text{пр2}}) + I_{\text{yy}}^2 (R_{\text{yy}} + R_{\text{пр}} + r_{\text{пр3}}), \quad (4.94)$$

или

$$P_{\text{н}} = U_{ab}I. \quad (4.95)$$

Подставим выражение (4.90) в (4.95):

$$P_{\text{н}} = (E_{\text{акб}} - Ir_{\text{акб}})I. \quad (4.96)$$

Выражение (4.96) показывает, что мощность нагрузки $P_{\text{н}}$ зависит от электродвижущей силы (ЭДС) аккумуляторной батареи, ее внутреннего сопротивления и полного тока в цепи. Примем, что нагрузка электропривода имеет максимальное значение и она постоянна на большом промежутке времени, т. е. $P_{\text{н}} = \text{const}$. Определим параметры АКБ при условии $I \rightarrow \min$, во-первых, для обеспечения работы секции в продолжительном режиме, согласно [6, 7, 154, 269, 325, 337, 338, 357] и рисунку 4.32, а во-вторых – для меньшей материалоемкости, так как от величины допустимого тока зависит величина поперечного сечения проводника силовой и вторичных цепей [23, 53].

Продолжительность потребления мощности оценивается энергией, поэтому умножим правую и левую части выражения (4.96) на промежуток времени работы секции дождевальнй машины:

$$P_{\text{н}}t_{\text{р}} = (E_{\text{акб}} - Ir_{\text{акб}})C_{\text{нд}}, \quad (4.97)$$

где $C_{\text{нд}}$ – допустимая разрядная емкость аккумуляторной батареи, А·ч;

$$C_{\text{нд}} = C_{\text{н}}(1 - k_{\text{q}}), \quad (4.98)$$

где k_q – допустимый коэффициент разряда емкости АКБ от номинальной C_N емкости (А·ч), $0,05 < k_q < 0,5$.

В данном исследовании необходимо учитывать количество пусков электродвигателя, так как в пусковой момент потребляется большее количество энергии, несмотря на то, что этот режим длится несколько секунд. Тогда представим общее количество энергии:

$$P_{\text{н}}t_{\text{р}} = P_{\text{ном}}t_{\text{рн}} + wP_{\text{п}}t_{\text{п}}, \quad (4.99)$$

где $P_{\text{п}}$ – потребляемая пусковая мощность электродвигателя, Вт; $t_{\text{п}}$ – продолжительность пуска, ч; w – количество пусков; $P_{\text{ном}}$ – потребляемая мощность в номинальном режиме, Вт; $t_{\text{рн}}$ – продолжительность номинального режима, ч.

Если представить количество энергии, необходимой для пуска, как часть энергии номинального режима:

$$P_{\text{п}}t_{\text{п}} = k_W P_{\text{ном}}t_{\text{рн}}, \quad (4.100)$$

где k_W – коэффициент, учитывающий продолжительность и мощность пуска, тогда полная энергия с числом пусков w :

$$P_{\text{н}}t_{\text{р}} = P_{\text{ном}}t_{\text{рн}} (1 + wk_W). \quad (4.101)$$

Выражение (4.97) связывает показатели ЭДС и емкости АКБ с нагрузкой. Величину тока в данном выражении можно заменить следующим выражением, используя закон Ома [53]:

$$I = \frac{P_{\text{н}}}{E_{\text{акб}}}. \quad (4.102)$$

С учетом условия $I \rightarrow \min$ ЭДС АКБ $E_{\text{акб}} \rightarrow \max$. Как уже отмечалось, в рассматриваемом случае необходимо принять тяговые аккумуляторные батареи, рассчитанные на длительную нагрузку. Для обеспечения низкого значения тока в цепи нужно собрать последовательно $n_{\text{акб}}$ аккумуляторных батарей стандартного вида:

$$E_{\text{акб}} = n_{\text{акб}}E_1, \quad (4.103)$$

где E_1 – ЭДС стандартной ТАБ, В.

Примем допущение, что динамические процессы, протекающие в ТАБ, при определении энергетических показателей оказывают несущественное влияние. Тогда внутреннее сопротивление источника:

$$r_{\text{акб}} = n_{\text{акб}} r_1. \quad (4.104)$$

Продолжительность работы секции дождевальной машины определяется через емкость АКБ, ток нагрузки и по характеристике разряда. Если принять ТАБ одного типа с одинаковой характеристикой разряда, ток нагрузки можно рассчитать по формуле (4.102). Тогда $m_{\text{акб}}$ параллельно соединенных АКБ обеспечат требуемую емкость C_N :

$$C_N = m_{\text{акб}} C_{N1}, \quad (4.105)$$

где C_{N1} – емкость стандартной ТАБ, А·ч.

Таким образом, источник постоянного тока будет собран из $n_{\text{акб}}$ последовательно и $m_{\text{акб}}$ параллельно соединенных ТАБ по схеме, представленной на рисунке 4.33.

С учетом данных соотношений определим зависимость продолжительности работы секции ДМ от параметров источника питания.

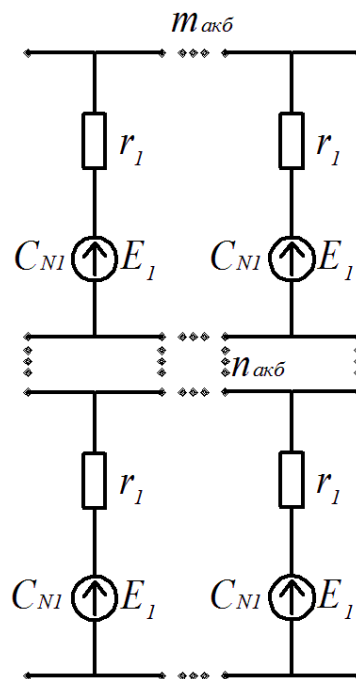


Рисунок 4.33 – Упрощенная схема соединения источника питания на ТАБ

Напряжение на зажимах ab (см. рисунок 4.31) в соответствии с внешней характеристикой (см. рисунок 4.32) зависит от внутреннего сопротивления ТАБ, собранной из $N_{акб}$:

$$N_{акб} = n_{акб} m_{акб}, \quad (4.106)$$

а также от характерной зависимости тока нагрузки в каждый момент времени t_{pi} , которую можно описать эмпирическим законом снижения ЭДС [14, 16, 38, 57, 66, 80, 81, 90, 89, 86, 97, 154, 163, 318, 249, 301, 306, 325, 327, 342, 346]:

$$E_{акбi} = E_{акб} \left[1 - e^{-\frac{C_N}{Y_{раз} I_i t_{pi}}} \right], \quad (4.107)$$

где $Y_{раз}$ – экспериментальный коэффициент аппроксимации разряда ТАБ; I_i – ток нагрузки в момент времени t_{pi} , А.

В нашем случае, учитывая допущение $P_H = \text{const}$, выражение (4.107) можно упростить согласно [14, 16] путем замены показателя степени экспоненты на коэффициент временного использования тока k_t , тогда ЭДС каждой ТАБ в каждый момент времени потребления энергии рассматриваемой нагрузки можно записать:

$$E_{акбi} = E_{акб}(1 - k_t t_p). \quad (4.108)$$

Емкость аккумуляторной батареи также зависит от тока в каждый момент времени [16, 301, 325]. В упрощенном виде можно записать:

$$C_{Nди} = C_{Nd}(1 - k_{qt} t_p), \quad (4.109)$$

где k_{qt} – коэффициент снижения емкости, зависящий от тока и продолжительности разряда [12, 16, 301].

Подставим выражения (4.101), (4.108) и (4.109) в исходное выражение (4.96), приняв $P_H = P_{ном}$, $t_p = t_{рн}$:

$$P_H t_p (1 + k_W w) = \left(n_{акб} E_1 (1 - k_t t_p) - \frac{P_H N_{акб} r_1}{n_{акб}^2 E_1 (1 - k_t t_p)} \right) m_{акб} C_{N1} (1 - k_q) (1 - k_{qt} t_p). \quad (4.110)$$

Преобразуем полученное выражение и выразим продолжительность работы t_p электропривода:

$$\frac{P_H t_p (1 - k_W w)}{m_{\text{акб}} C_{N1}} + n_{\text{акб}} E_1 k_t t_p k_q + n_{\text{акб}} E_1 k_{qt} t_p - n_{\text{акб}} E_1 k_t k_{qt} t_p^2 - \frac{P_H N_{\text{акб}} r_1 k_{qt} t_p}{n_{\text{акб}}^2 E_1 (1 - k_t t_p)} + \frac{P_H N_{\text{акб}} k_q r_1}{n_{\text{акб}}^2 E_1 (1 - k_t t_p)} = n_{\text{акб}} E_1 k_q. \quad (4.111)$$

Представим

$$\left. \begin{aligned} A1 &= \left[\frac{P_H (1 - k_W w)}{m_{\text{акб}} C_{N1}} + n_{\text{акб}} E_1 k_t k_q + n_{\text{акб}} E_1 k_{qt} \right]; \\ B1 &= n_{\text{акб}} E_1 k_t k_{qt}; \\ C1 &= \frac{P_H N_{\text{акб}} r_1 k_{qt}}{n_{\text{акб}}^2 E_1}; \\ D1 &= \frac{P_H N_{\text{акб}} r_1 k_q}{n_{\text{акб}}^2 E_1}; \\ F1 &= n_{\text{акб}} E_1 k_q. \end{aligned} \right\}. \quad (4.112)$$

Тогда выражение (4.111) примет вид:

$$A1 t_p - B1 t_p^2 - \frac{C1 t_p}{(1 - k_t t_p)} + \frac{D1}{(1 - k_t t_p)} = F1. \quad (4.113)$$

Полученное выражение (4.113) является кубическим по времени t_p . Согласно [182, 238, 307], оно будет иметь три решения. Математическое описание данного физического процесса оказывается сложным. Поэтому объективным решением выражения (4.113) с точки зрения физического процесса будет одно решение – наиболее приближенное к реальным данным.

Преобразуем (4.113):

$$A1 t_p - A1 k_t t_p^2 - B1 t_p^2 + B1 k_t t_p^3 - C1 t_p + D1 = F1 - F1 k_t t_p. \quad (4.114)$$

Обозначим:

$$\left. \begin{aligned} A2 &= B1 k_t, \\ B2 &= -(A1 k_t + B1), \\ C2 &= A1 - C1 + F1 k_t, \\ D2 &= D1 - F1. \end{aligned} \right\}. \quad (4.115)$$

Получим:

$$A2 t_p^3 + B2 t_p^2 + C2 t_p + D2 = 0. \quad (4.116)$$

Для решения полученного уравнения (1.116) воспользуемся теоремой Виета [238] для корней полного кубического уравнения:

$$\left. \begin{aligned} t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} &= -\frac{B2}{A2}; \\ t_{p1}t_{p2} + t_{p2}t_{p3} + t_{p1}t_{p3} &= \frac{C2}{A2}; \\ t_{p1}t_{p2}t_{p3} &= -\frac{D2}{A2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.117)$$

Учесть изменение ЭДС и емкости АКБ в конкретный момент времени сложно из-за влияния различных особенностей и внешней характеристики ТАБ, поэтому примем идеальный случай, когда функция зависимости $t_p = f(n_{акб}; m_{акб})$ при постоянной ЭДС и емкости в каждый момент времени остается неизменной. Тогда с учетом данного допущения, преобразовав выражение (4.110), определим, что продолжительность работы электропривода секции ДМ зависит от количества и схемы соединения аккумуляторных батарей:

$$t_p = \frac{N_{акб} C_{N1} (1 - k_q) E_1 - \frac{N_{акб} P_n m_{акб} C_{N1} (1 - k_q) r_1}{n_{акб}^2 E_1}}{P_n (1 + k_w w) + N_{акб} C_{N1} E_1 k_t}. \quad (4.118)$$

Представим данную зависимость графически (рисунок 4.34).

Анализируя полученную зависимость, необходимо определить, в каком случае обеспечивается большая продолжительность работы электропривода t_p . Можно предположить, что это происходит при равном количестве параллельно и последовательно соединенных АКБ ($n_{акб} = m_{акб}$).

Однако при сравнении того же количества АКБ, но при $n_{акб} \neq m_{акб}$ большую продолжительность (на 1,0–12,0 %) обеспечивает последовательное соединение АКБ, т. е. $n_{акб} > m_{акб}$. Это связано с внешней характеристикой аккумулятора – чем больше напряжение на зажимах нагрузки, тем меньше ток в цепи, тем дольше проходит разрядка АКБ. Например, при параллельном соединении напряжение на зажимах соответствует напряжению одной батареи, тогда ток разряда будет большего значения и станет ускоренно разряжать АКБ [14], несмотря на большую суммарную емкость.

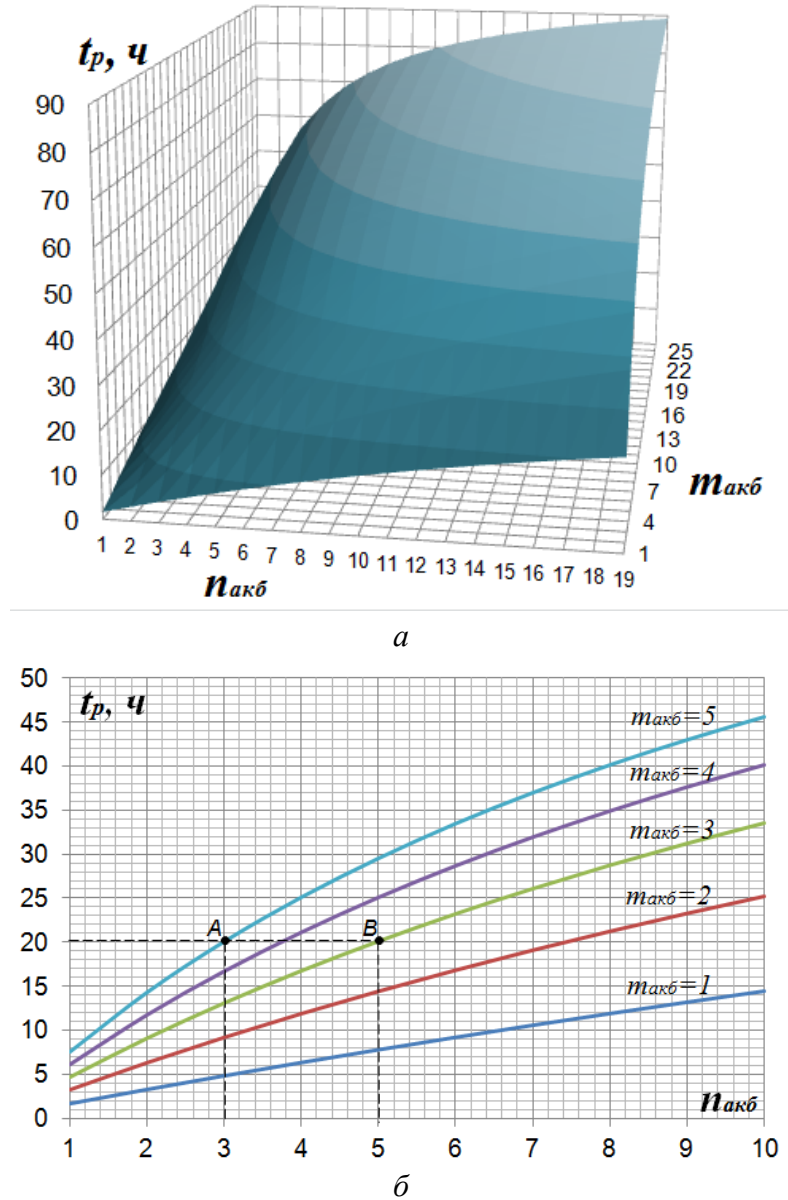


Рисунок 4.34 – Зависимость продолжительности работы электропривода опорной тележки ДМ от числа $n_{акб}$ последовательно и $m_{акб}$ параллельно соединенных аккумуляторных батарей (при однократном пуске и напряжении каждой ТАБ 12 В с внутренним сопротивлением 0,002 Ом и емкостью 100 А·ч):
 а – 3-мерное изображение: б – 2-мерное

Эту разницу можно оценить отношением параллельно включенных к последовательно включенным АКБ:

$$\Delta v = \frac{m_{акб}}{n_{акб}}; \quad (4.119)$$

$$m_{акб} = \Delta v n_{акб}.$$

Тогда доля увеличения продолжительности работы электропривода:

$$\Delta t_p = \frac{t_p(m_{\text{акб}} = 1) - t_p(m_{\text{акб}} \neq 1)}{t_p(m_{\text{акб}} = 1)} = 1 - \frac{\left(\frac{\Delta v n_{\text{акб}}^2 C_{N1} (1 - k_q) E_1 - \frac{\Delta v^2 n_{\text{акб}} P_H C_{N1} (1 - k_q) r_1}{E_1}}{P_H (1 + k_w w) + \Delta v n_{\text{акб}}^2 C_{N1} E_1 k_t} \right)}{\left(\frac{n_{\text{акб}} C_{N1} (1 - k_q) E_1 - \frac{P_H C_{N1} (1 - k_q) r_1}{n_{\text{акб}} E_1}}{P_H (1 + k_w w) + n_{\text{акб}} C_{N1} E_1 k_t} \right)}. \quad (4.120)$$

Если источник питания состоит из одной ветви $m_{\text{акб}} = 1$ последовательно соединенных аккумуляторных батарей (рисунок 4.35), то в этом случае $I \rightarrow \min$, и согласно [86, 89] аккумуляторные батареи имеют лучшую характеристику снижения емкости.

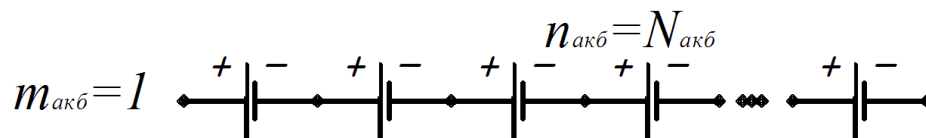


Рисунок 4.35 – Оптимальная схема соединения аккумуляторных батарей

На рисунке 4.36 представлена зависимость изменения продолжительности работы электропривода от коэффициента отношения параллельно включенных к последовательно включенным АКБ.

Выбор схемы последовательного и параллельного включения АКБ зависит от номинального напряжения электродвигателя и устройств управления. Поэтому количество последовательно соединенных АКБ ограничено.

Существенное влияние на продолжительность работы секции оказывает внутреннее сопротивление каждой АКБ. При высоком внутреннем сопротивлении ($r_1 > 0,02$ Ом) выполнение работы в продолжительном режиме невозможно, так как значительная часть емкости разряда будет обеспечивать работу тока на преодоление только внутреннего сопротивления.

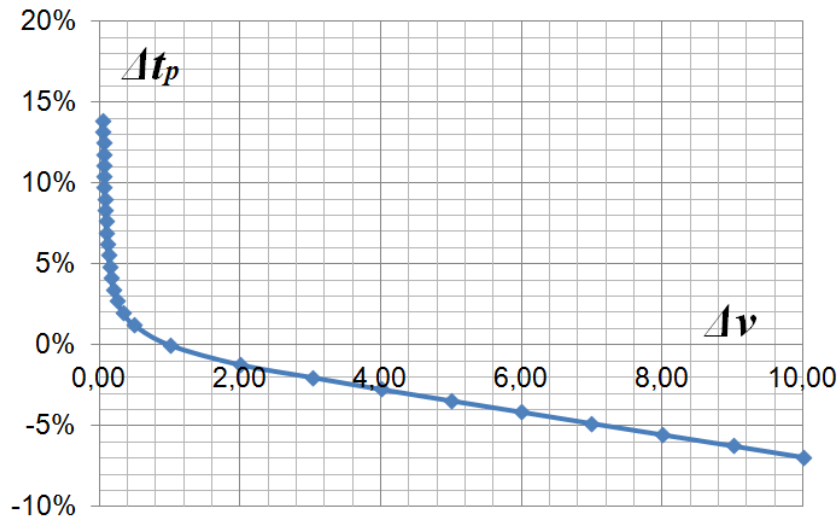


Рисунок 4.36 – Изменение продолжительности работы электропривода в зависимости от коэффициента отношения параллельно включенных к последовательно включенным АКБ

Вместе с перечисленными параметрами на разрядные характеристики АКБ влияет температурный режим. Емкость АКБ связана с температурой окружающей среды экспоненциальной зависимостью. Например, в гелевых свинцово-кислотных аккумуляторах она падает при низких температурах. При температуре 20...30 °С этот показатель поддерживается на уровне 100 %. При большей температуре ($40 < T < 80$ °С) емкость падает незначительно – до 75–85 % [337, 338], а при низкой температуре ($-40 < T < 0$ °С) – до 40–55 % от номинальной [301, 337, 338]. Однако сезонная эксплуатация ДМ происходит при 15...35 °С, что соответствует нормальному режиму использования АКБ на 100%-м уровне емкости.

Таким образом, использование аккумуляторного источника питания ограничивает продолжительность работы электропривода опорной тележки секции ДМ. Для того, чтобы обеспечить работу секции с номинальной мощностью электропривода 500 Вт на 8 ч, необходимо установить 6 шт. ТАБ напряжением $E_1 = 12$ В с внутренним сопротивлением $r_1 = 0,002$ Ом, емкостью $C_{M1} = 100$ А·ч, с коэффициентом максимального разряда $k_q = 0,30$ и коэффициентом временного использования тока $k_t = 0,01$. Вместе с этим аккумуляторные батареи требуется периодически стабильно заряжать, что в полевых условиях открывает возможность использования возобновляемых источников энергии – солнечных батарей и ветрогенераторов. В некоторых случаях для обеспечения высокой надежности системы можно использовать маломощный переносной генератор для подзарядки ТАБ, работающий в совокупной комбинации с возобновляемыми источниками (ВИЭ).

*Обоснование параметров аккумуляторного источника питания
дождевальная машины с использованием возобновляемых источников энергии*

Каждая опорная тележка ДМ проходит различный путь, как это отмечалось в параграфе 4.1. Пропорционально пройденному пути требуется обеспечить продолжительность работы электропривода опорных тележек каждой секции и, соответственно, укомплектовать необходимым количеством ТАБ. Рассмотрим пропорциональность времени работы секций при совершении дождевальной машины одного оборота (рисунок 4.37).

Если на каждой опорной тележке установлены электроприводы с одинаковыми номинальной мощностью и частотой вращения вала, то большая часть электроприводов будет находиться в режиме простоя. Например, путь пройденный первой секцией в секторе окружности 1 рад, составит 3 м, второй секцией – 6 м, третьей – 9 м и т. д. Первая секция всегда будет ждать, пока проедут этот сектор остальные секции [33].

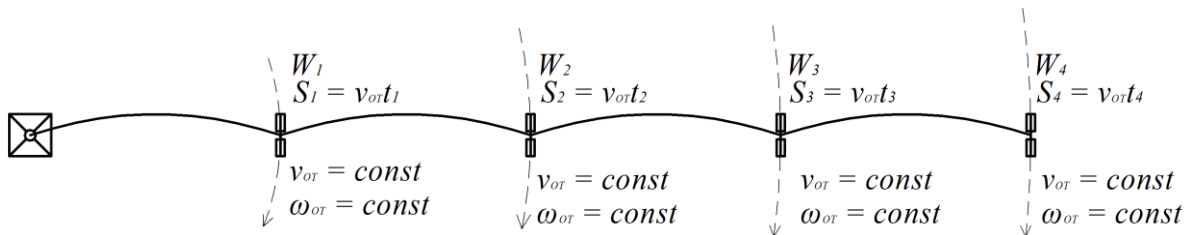


Рисунок 4.37 – Внешний вид и динамические характеристики выполнения движения каждой секцией ДМ (v_{OT} и ω_{OT} – линейная и угловая скорости перемещения опорных тележек секций)

Рассчитаем продолжительность работы электропривода на примере первой опорной тележки секции ДМ. Продолжительность работы первой опорной тележки секции зависит от длины водопроводящего трубопровода секции l_1 :

$$t_{pl} = \frac{s_1}{v_{OT}} = \frac{2\pi l_1}{v_{OT}}, \quad (4.121)$$

где v_{OT} – линейная скорость перемещения, м/с (зависит от частоты вращения колес и, соответственно, электродвигателя, а также от продолжительности цикла повторного включения электропривода).

Минимальное потребление энергии на перемещение опорной тележки первой секции при $t \rightarrow \min$:

$$W_1 = P_{\text{двГТ1}} t_{\text{р1}} = \frac{2\pi l_1 P_{\text{двГТ1}}}{\text{ПВ} v_{\text{от}}} = a_{\text{пр}} n_{\text{акб}} E_1 m_{\text{акб}} C_{N1} = W_{\text{1акб}}, \quad (4.122)$$

где ПВ – показатель продолжительности включения электропривода в цикле; $a_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования зависимости (4.110).

Для опорной тележки второй секции, с учетом того, что длины трубопроводов секций равны ($l_1 = l_2$):

$$W_2 = P_{\text{двГТ1}} t_{\text{р2}} = \frac{2\pi(l_1 + l_2) P_{\text{двГТ1}}}{\text{ПВ} v_{\text{от}}} = 2a_{\text{пр}} n_{\text{акб}} E_1 m_{\text{акб}} C_{N1} = 2W_{\text{1акб}}. \quad (4.123)$$

Для опорной тележки j -й секции:

$$W_j = P_{\text{двГТ1}} t_{\text{рj}} = \frac{2\pi(l_1 + l_2 + \dots + l_j) P_{\text{двГТ1}}}{\text{ПВ} v_{\text{от}}} = ja_{\text{пр}} n_{\text{акб}} E_1 m_{\text{акб}} C_{N1} = jW_{\text{1акб}}. \quad (4.124)$$

Общее количество энергии:

$$\Sigma W = W_{\text{1акб}} + 2W_{\text{1акб}} + \dots + jW_{\text{1акб}} = P_{\text{двГТ1}} t_{\text{рДМ}} = \left(\frac{j(j+1)}{2} \right) W_{\text{1акб}}. \quad (4.125)$$

Дождевальная машина движется дискретно в повторно-кратковременном режиме, максимальная скорость полива – при ПВ = 100 % и продолжительности:

$$t_{\text{рДМ}} = t_{\text{рj}}, \quad (4.126)$$

где $t_{\text{рj}}$ – продолжительность работы крайней (последней) опорной тележки j -й секции, ч.

Тогда в таком же режиме работает опорная тележка предпоследней секции:

$$t_{\text{рj-1}} = \frac{j-1}{j} t_{\text{рj}} = t_{\text{рj}} - t_{\text{прj-1}}, \quad (4.127)$$

где $t_{\text{прj-1}}$ – продолжительность простоя опорной тележки секции $j-1$, ч.

Остальные опорные тележки секций будут задействованы пропорционально меньший промежуток времени в соответствии с выражением (4.127), что подтверждается выражением (4.121).

Если необходимо выполнить максимальную поливную норму $m_{\text{пн-мах}}$, повторность включения уменьшают. Например, при ПВ = 10 % продолжительность работы всей дождевальной машины увеличивается на промежуток времени простоя:

$$t_{\text{рДМ}} = t_{\text{рj}} + t_{0j}, \quad (4.128)$$

где t_{0j} – продолжительность простоя опорной тележки крайней секции, ч.

В данном случае продолжительность работы опорных тележек предыдущих секций будет пропорционально сдвинута на t_{0j} .

В момент простоя опорной тележки секции энергия не потребляется, т. е. при рассмотрении выбора АКБ для всех секций ДМ достаточно рассматривать движение в повторно-кратковременном режиме ПВ = 100 %. Отсюда следует, что общее количество ТАБ для выполнения полива (при полном обороте ДМ) дождевальной машиной можно определить по формуле (рисунок 4.38):

$$N_{\text{акбДМ}} = \frac{P_{\text{двГТ}} t_{\text{рДМ}} \left(\frac{1+j}{2} \right)}{E_1 C_{N1}}, \quad (4.129)$$

где j – количество секций (опорных тележек) дождевальной машины, ед.; $N_{\text{акбДМ}}$ – суммарное число аккумуляторов, зависящее от индивидуальной продолжительности работы электропривода каждой опорной тележки, шт.

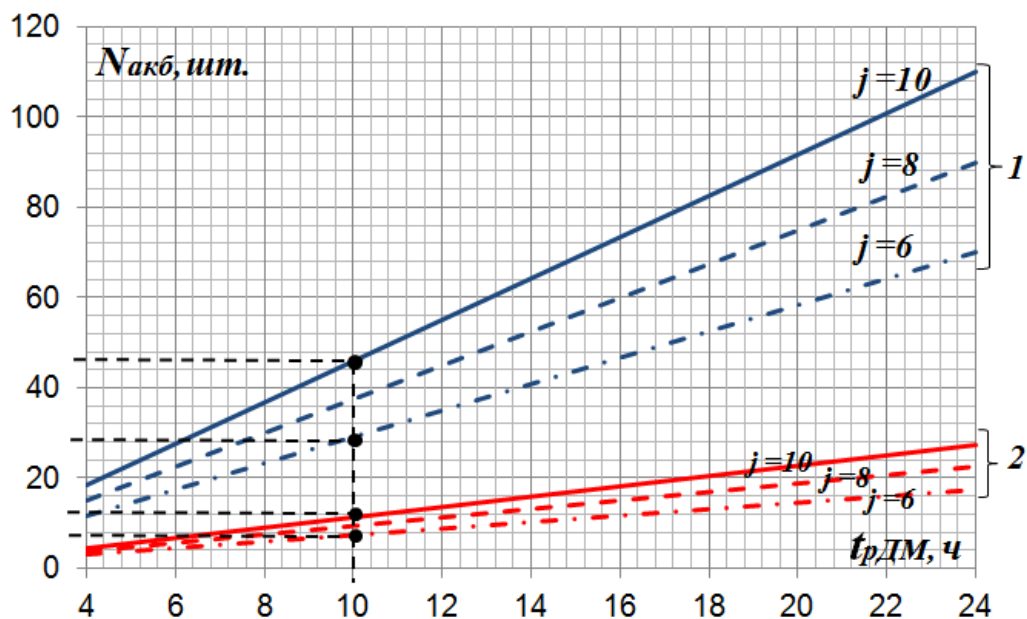


Рисунок 4.38 – Зависимость количества ТАБ от продолжительности работы дождевальной машины при условиях: 1 – $E_1 = 12$ В, $C_{N1} = 55$ А·ч; 2 – $E_1 = 24$ В, $C_{N1} = 110$ А·ч

Количество ТАБ для дождевальнoй машины $N_{акбДМ}$ зависит от числа секций j . Например, ТАБ с параметрами $E_1 = 12$ В и $C_{N1} = 55$ А·ч обеспечивают 10 ч работы дождевальнoй машины, состоящей из 10 секций, в количестве 48 шт., а ДМ из 8 секций – 38 шт. Если ТАБ имеет характеристики $E_1 = 24$ В и $C_{N1} = 110$ А·ч, то ДМ, состоящая из 10 секций, проработает 10 ч на 12 таких аккумуляторных батареях.

На рисунке 4.39 представлена зависимость количества ТАБ от количества секций ДМ при $t_{рДМ} = 24$ ч; $E_1 = 12$ В; $C_{N1} = 55$ А·ч.

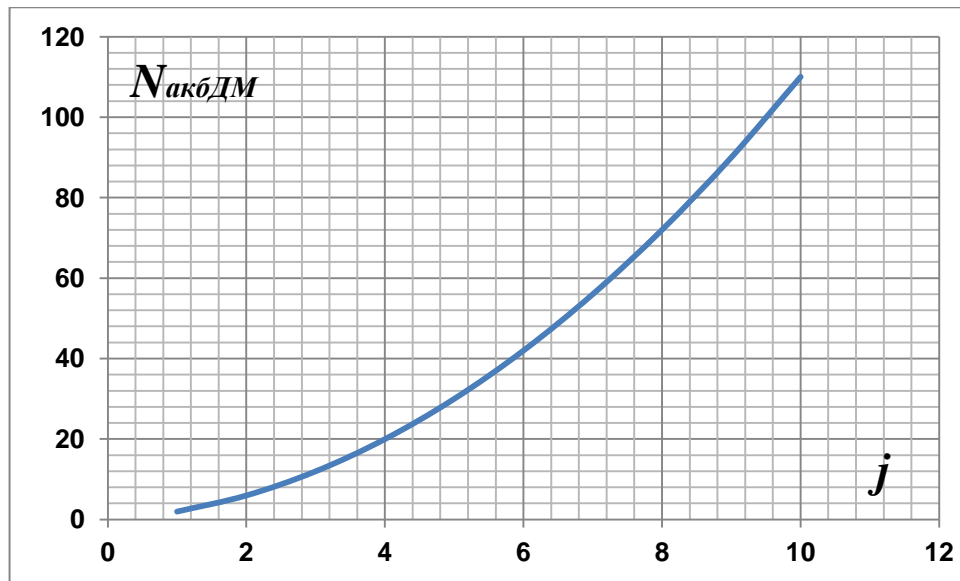


Рисунок 4.39 – Зависимость количества ТАБ от количества секций ДМ при $t_{рДМ} = 24$ ч; $E_1 = 12$ В; $C_{N1} = 55$ А·ч

Энергию, потребляемую от аккумуляторной батареи, необходимо восполнять. Восстановление запаса энергии аккумуляторной батареи оценивается параметрами емкости C_{N1} и напряжения на зажимах U_{ab} .

Из различных литературных источников [22, 28, 33, 55, 69, 88, 143, 155, 164, 218, 230, 285, 290, 310] известно: чтобы восполнить энергию, переданную аккумулятором нагрузке, требуется энергия для заряда в соотношении:

$$W_3 = (1,2 \dots 1,3)W_p, \quad (4.130)$$

где W_3 и W_p – соответственно количество энергии заряда и разряда, кВт·ч.

Для заряда аккумуляторов дождевальнoй машины целесообразно использовать возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Во-первых, условия эксплуата-

ции ДМ позволяют использовать их на открытом воздухе под действием прямых солнечных лучей и ветра. Во-вторых, первичная энергия ВИЭ является бесплатной, а стоимость вырабатываемой энергии определяется эксплуатационными затратами на обслуживание.

Примем допущение, что от возобновляемых источников энергии (например, от солнечной батареи стандартного типоразмера) можно получить в сутки для каждой секции энергию заряда $(0,2 \dots 0,4)W_p$ с вероятностью $M(t) = 0,9$ [230, 310]. Такое же количество энергии заряда можно получить от ветрогенератора.

Определим промежуток времени, необходимый для восстановления энергии источника питания ДМ между поливами в двух случаях, когда электропривод опорной тележки крайней секции работает в режимах ПВ = 100 % и ПВ = 10 %.

Рассчитаем количество фактической потребленной энергии и полученной энергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) при ПВ = 100 % для одной секции ДМ. Остаточная энергия в АКБ:

$$W_{\text{АКБ}i} = W_{\Sigma\text{АКБ}} - W_{1p} + W_{1з} = W_{\Sigma\text{АКБ}} - P_{\text{двГ1}}t_{p\text{-сут}} + W_{\text{ВИЭ}}, \quad (4.131)$$

где $W_{\Sigma\text{АКБ}}$ – номинальное максимальное количество энергии, запасенное в АКБ, кВт·ч; $t_{p\text{-сут}}$ – продолжительность работы секции ДМ, ч; $W_{\text{ВИЭ}}$ – количество энергии, полученное от возобновляемого источника энергии, кВт·ч.

Количество энергии от ВИЭ за 1 сут. (кВт·ч) можно определить по выражению:

$$W_{\text{ВИЭ-сут}} = \frac{W_{\text{ВИЭ}}}{n_{\text{сут}}}, \quad (4.132)$$

где $n_{\text{сут}}$ – количество суток.

Если выразить количество энергии от ВИЭ в сутки как энергию разряда АКБ:

$$W_{\text{ВИЭ-сут}} = \frac{k_3}{k_{\text{ЭКВ}}} W_{1p} = \frac{k_3}{k_{\text{ЭКВ}}} P_{\text{двГ1}} t_{p\text{-сут}}, \quad (4.133)$$

где k_3 – коэффициент, учитывающий полученную энергию от ВИЭ относительно затраченной энергии, $k_3 = 0,2 \dots 0,3$ с вероятностью $M(t) = 0,9$; $k_{\text{ЭКВ}}$ – коэффициент эквивалентного заряда АКБ, $k_{\text{ЭКВ}} = 1,2 \dots 1,3$ [230],

тогда остаточная энергия АКБ с учетом продолжительности включения (ПВ), выраженной в долях:

$$W_{\text{АКБ}i} = W_{\Sigma\text{АКБ}} - P_{\text{двТГ1}} t_{\text{р-сут}} \text{ПВ} + \frac{k_3}{k_{\text{ЭКВ}}} P_{\text{двТГ1}} t_{\text{р-сут}}. \quad (4.134)$$

Если $t_{\text{р-сут}} = t_{\text{р}}$, то с учетом данных выражения (4.114) можно определить количество суток y , которое потребуется для восстановления номинальной максимальной энергии в АКБ [33]:

$$y = \frac{W_{\text{р}}}{\frac{W_{\text{ВИЭ}}}{n_{\text{сут}}}} = n_{\text{сут}} \frac{P_{\text{двТГ1}} t_{\text{р}} \text{ПВ}}{W_{\text{ВИЭ}}}, \quad (4.135)$$

где ПВ – продолжительность включения в цикле, указанная в долях, $\text{ПВ} = (0,1 \dots 1,0)$.

Если за 1 сут. ($n_{\text{сут}} = 1$, $t_{\text{сут}} = 24$ ч) можно получить энергию от возобновляемого источника энергии согласно (4.133), то после преобразования получим промежуток времени восстановления номинальной максимальной энергии АКБ y' :

$$y' = t_{\text{сут}} \frac{k_{\text{ЭКВ}} \text{ПВ}}{k_3}. \quad (4.136)$$

Изобразим восстановление энергии АКБ при различных режимах работы (ПВ = 100 % и ПВ = 10 %) (рисунок 4.40).

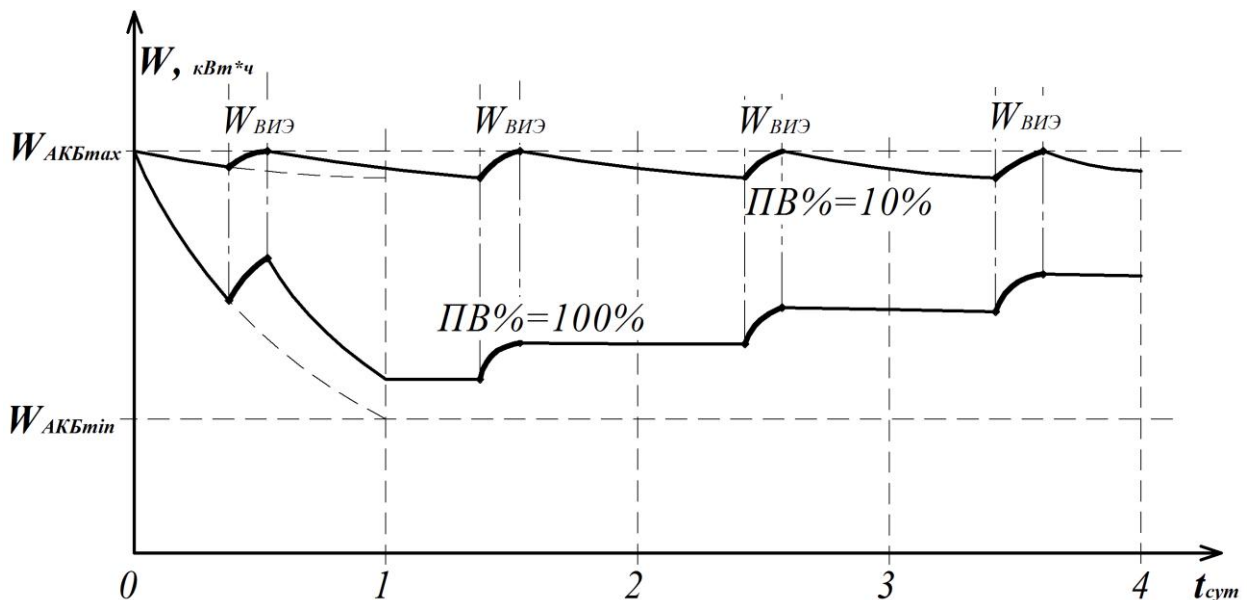


Рисунок 4.40 – Продолжительность восстановления номинальной максимальной энергии АКБ при получении 20 % от ВИЭ с ПВ = 10 % и ПВ = 100 %

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод о том, что аккумуляторный источник питания позволяет эксплуатировать ДМ в условиях, сложных для подведения централизованного питания. В отличие от переносного генератора, АКБ можно устанавливать на передвижных опорных тележках, что исключает

использование дорогостоящих токосъемника и кабельной линии для передачи энергии. С аккумуляторным питанием управление движением машины можно выполнить на более низком энергетическом уровне (например, питание всех приборов ПСЛ от 12 В постоянного тока), что снизит потребление энергии на устройство управления. Для реализации такого способа питания разработана автономная электрифицированная секция ДМ (рисунок 4.41), на которую получен патент на полезную модель [211].

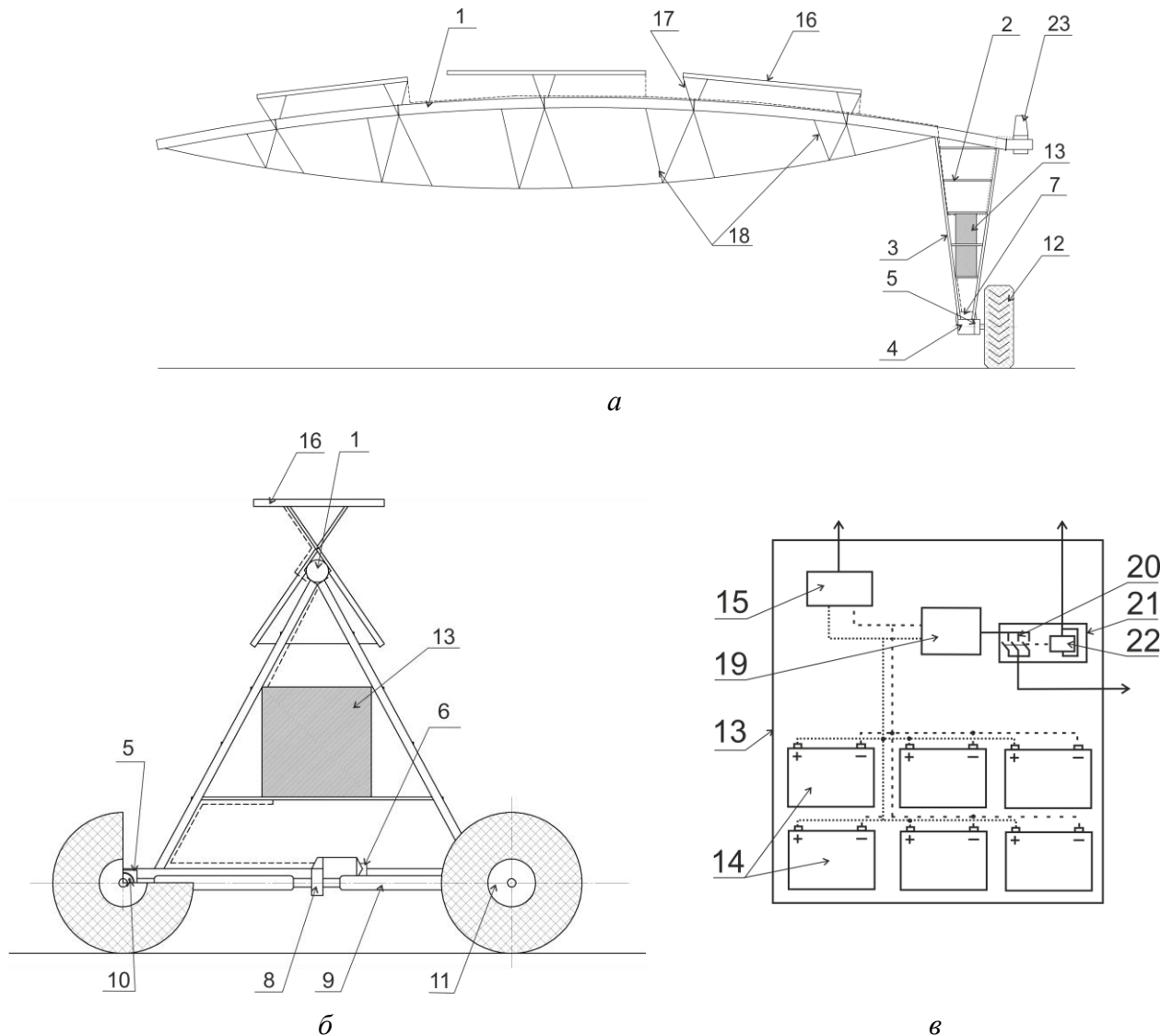


Рисунок 4.41 – Автономная секция ДМ: *а* – общий вид; *б* – вид сбоку; *в* – структурная схема соединения элементов питания; 1 – трубопровод; 2 – опорная тележка; 3 – А-образная рама; 4 – поперечная балка; 5 – колесные редукторы; 6 – кронштейн; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор; 9 – карданный вал; 10 – крепежный фланец; 11 – колеса; 12 – пневматические шины; 13 – герметичный щит; 14 – аккумуляторные батареи; 15 – контроллер заряда; 16 – солнечные батареи; 17 – Х-образные кронштейны; 18 – ферма водопроводящего трубопровода; 19 – инверторный преобразователь; 20 – контакты; 21 – магнитный пускатель; 22 – прибор синхронизации движения в линию

Автономная электрифицированная секция ДМ состоит из водопроводящего трубопровода 1, опорной тележки 2 из А-образной рамы 3, поперечной балки 4, колесных редукторов 5, кронштейна 6 электродвигателя 7, редуктора 8 с двумя выходными валами, карданных валов 9, колес 11 с пневматическими шинами 12, герметичного щита 13 с аккумуляторными батареями 14, соединенными через контроллер заряда 15 с солнечными батареями 16, установленными на Х-образных кронштейнах 17, закрепленных к ферме 18 водопроводящего трубопровода 1. Имеется также инверторный преобразователь 19, выводы которого соединены с электродвигателем 7 через контакты 20 магнитного пускателя 21. Его катушка 22 соединена с прибором 23 синхронизации движения в линию дождевальную машины кругового действия.

При выборе параметров аккумуляторного питания (напряжение на зажимах нагрузки, емкость, схемы соединения) следует учитывать продолжительность выполнения движения крайней секции в режиме непрерывного хода, когда ПВ = 100 %. Установлено, что применение возобновляемых источников энергии в количестве 15–20 % от запасенной энергии АКБ в сутки с вероятностью $M(t) = 0,9$ позволит избежать затрат на ресурс в структуре общих эксплуатационных затрат. В режиме работы электропривода опорной тележки крайней секции ДМ ПВ = 100 % для полного заряда АКБ потребуется 5–7 дней (что по длительности совпадает с технологическими простоями между поливами), а при ПВ = 10 % – 1 день.

4.4 Оценка энергетической эффективности применения бустерного насоса с электроприводом крайней секции дождевальной машины

При проектировании полива культурных растений дождевальными машинами кругового действия стремятся охватить максимально возможную площадь.

Обычно на необходимую поливную площадь комплектуют ДМ требуемым количеством секций. Для полива дополнительной площади в конструкцию ДМ добавляют секцию, тем самым увеличивая охват ДМ. Зарубежные производители ДМ [147–152] предлагают различные варианты исполнения крайней секции, которая может быть поворотной [147, 149] с дополнительно установленным оборудованием (поворотным механизмом с электроприводом и специальной системой автоматизации). Также предлагают другие варианты исполнения крайней секции [147–152].

Новый способ увеличения охвата полива путем установки на крайнюю секцию бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным дождевальным аппаратом (ДА) необходимо рассмотреть с позиции энергопотребления. Предварительные исследования применения бустерного насоса показывают, что можно увеличить охват полива по нескольким вариантам (рисунок 4.42) при различных настройках системы управления электроприводом насоса.

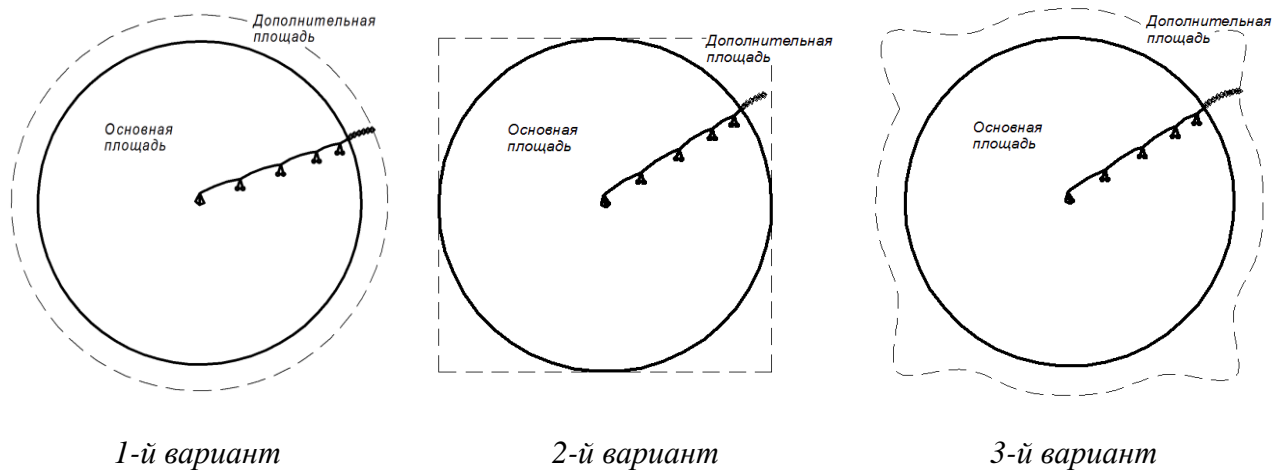


Рисунок 4.42 – Варианты дополнительного охвата поливной площади за счет применения бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА

Данный способ охвата дополнительной площади полива требует установки дополнительного оборудования и подведения электроэнергии. Энергопотребление бустерного насоса определяется продолжительностью работы и мощностью электродвигателя этого насоса. Также дополнительный охват, представленный 1-м и 3-м вариантами рисунка 4.42, можно обеспечить путем установки дополнительного водораспределительного трубопровода с опорной тележкой. Энергопотребление электропривода на перемещение этой тележки определяется продолжительностью его работы и потребляемой мощностью. Данные способы охвата дополнительной площади необходимо обосновать по критерию наименьшего энергопотребления, а также рассмотреть возможные варианты установки бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА на крайнюю секцию ДМ [121].

При сравнении энергопотребления на перемещение крайней секции и действия бустерного насоса необходимо учитывать площадь охвата рассматриваемых вариантов. Охват полива крайней секцией, т. е. площади поливного участка, зависит от длины трубопровода секции l (м) и порядкового номера n секции (рисунок 4.43).

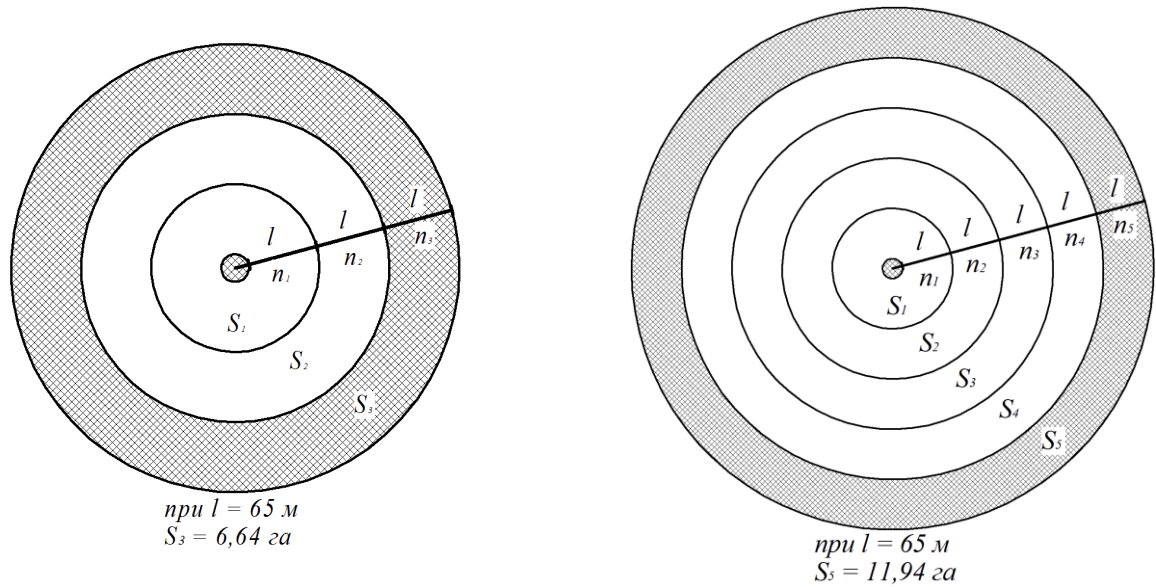


Рисунок 4.43 – Охват полива крайней секцией с разным порядковым номером n секции

Поливная площадь крайней секции увеличивается в зависимости от порядкового номера (рисунок 4.44).

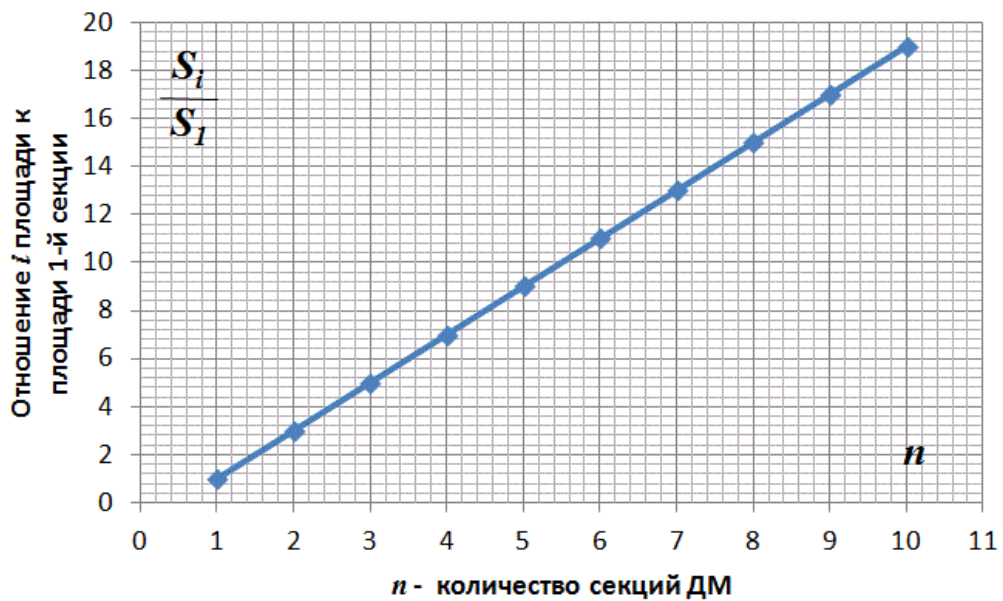


Рисунок 4.44 – Зависимость отношения площади полива i -й секцией к площади полива 1-й секцией от количества секций ДМ

На основе приведенных данных удельное энергопотребление на единицу поливной площади следует принять в виде показателя w_s (кВт·ч/га):

$$w_s = \frac{W_i}{S_i}, \quad (4.137)$$

где W_i – количество электроэнергии, необходимой на полив участка площадью S_i (га), кВт·ч.

Тогда удельное энергопотребление электропривода опорной тележки крайней секции:

$$w_{Sn} = \frac{W_n}{b_n \pi l^2}, \quad (4.138)$$

где b_n – коэффициент площади, учитывающий порядковый номер крайней секции (таблица 4.3);

$$b_n = \frac{S_n}{S_1}, \quad (4.139)$$

где S_n – площадь полива n -й секцией, га; S_1 – площадь полива 1-й секцией, га (с учетом того, что длина всех секций ДМ одинакова – $l_1 = l_2 = \dots = l_n = l$).

Таблица 4.3 – Результаты расчета коэффициента площади по порядковому номеру секции

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| Номер секции n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Коэффициент площади b_n | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |

По аналогии удельное энергопотребление бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА на предпоследней секции (вместо крайней) можно выразить:

$$w_{нС} = \frac{W_{нС}}{S_{нС}}, \quad (4.140)$$

где $W_{нС}$ – количество электроэнергии, потребляемой насосом, кВт·ч; $S_{нС}$ – площадь охвата полива насосом, га.

Количество электроэнергии для насоса будет зависеть также от количества пусков и кратности пускового тока электродвигателя насоса:

$$W_{нС} = P_{наС} (t_{р-н} + w_{нС} \bar{k}_{Пн} t_{п-н}), \quad (4.141)$$

где $P_{наС}$ – мощность электродвигателя насоса, кВт; $t_{р-н}$ – продолжительность работы насоса в нормальном режиме, ч; $w_{нС}$ – количество пусков насоса; $t_{п-н}$ – продолжительность пускового режима насоса, ч; $\bar{k}_{Пн}$ – среднее значение кратности пускового тока.

Площадь охвата дальнеструйного аппарата $S_{нС}$ определяется по дальности струи $l_{нС}$, а также из положения, что насос находится на предпоследней секции (так

как сравнивается с крайней секцией), что связывает площадь охвата полива струей с коэффициентом площади b_n . Тогда площадь полива насосом:

$$S_n = b_n \pi l_n^2. \quad (4.142)$$

Дальность струи l_n зависит от мощности насоса, типа ДА и также может быть сравнима с длиной водораспределительного трубопровода l соотношением (рисунок 4.45):

$$l_n = a_n l, \quad (4.143)$$

где a_n – относительный коэффициент пропорциональности охвата полива насосом и водораспределительным трубопроводом.

Условием применения бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА будет неравенство:

$$w_{HS} < w_{Sn}. \quad (4.144)$$



Рисунок 4.45 – Полив бустерным насосом, установленным на предпоследней секции:
а – с охватом $l_n < l$; б – с охватом $l_n > l$

Подставим в неравенство (4.144) выражения (4.140) и (4.118) и обозначим потребление энергии через потребляемые мощности электродвигателей насоса $P_{нас}$ и опорной тележки секции $P_{двГ1}$:

$$\frac{P_{нас} (t_{p-n} + w_n k_{Пн} t_{п-н})}{b_n \pi (a_n l)^2} < \frac{P_{двГ1} (t_p + w k_w t_n)}{b_n \pi l^2}. \quad (4.145)$$

Продолжительность работы и число запусков электропривода опорной тележки крайней секции будут зависеть от заданного режима полива. Можно предположить, что режим работы бустерного насоса будет таким же. Примем допущение, что при одинаковом режиме полива $t_{p-n} = t_p$, $w = w_n$ кратность пусковых токов

и продолжительность пуска пропорционально соотносятся с потребляемой мощностью рассматриваемых двигателей, которыми можно пренебречь при расчетах энергопотребления. Тогда, преобразовав условие (4.145), получим:

$$a_n > \sqrt{\frac{P_{\text{нас}}}{P_{\text{двГ1}}}}, \quad (4.146)$$

или

$$l_n > l \sqrt{\frac{P_{\text{нас}}}{P_{\text{двГ1}}}}. \quad (4.147)$$

Таким образом, условие (4.147) показывает, что применение бустерного насоса относительно показателя удельного энергопотребления будет оправданным, если охват дальнеструйного аппарата будет больше произведения ширины захвата водораспределительного трубопровода одной секции на квадратный корень отношения мощностей электродвигателей рассматриваемых вариантов. Определим границу применения бустерного насоса на графике (рисунок 4.46).

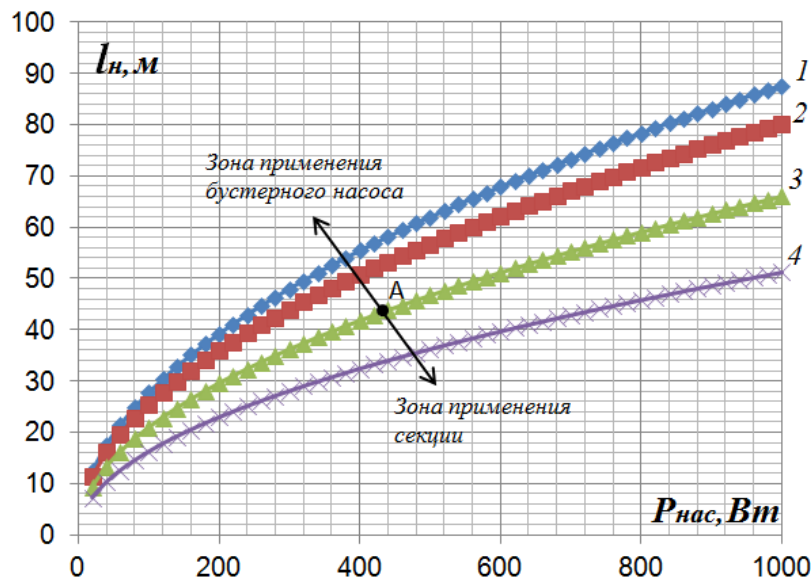


Рисунок 4.46 – Границы применения бустерного насоса с дальнеструйным ДА при мощности электродвигателя опорной тележки секции $P_{\text{двГ1}} = 550$ Вт и длине трубопровода секции: 1 – $l = 65$ м; 2 – $l = 59,5$ м; 3 – $l = 49$ м; 4 – $l = 38$ м

Применение бустерного насоса будет оправданным по критерию минимального энергопотребления, например, если потребляемая мощность электродвигателя насоса $P_{\text{нас}} = 440$ Вт, а дальность струи $l_n > 44$ м (точка A на рисунке 4.46). При

меньшей дальности струи ДА лучшим вариантом будет применение секции. Таким образом, если необходима большая мощность насоса (например, $P_{\text{нас}} = 1000 \text{ Вт}$), то дальность струи $l_{\text{н}}$ должна превышать 88 м.

Однако граница применения бустерного насоса на рисунке 4.46 учитывает только показатель удельного энергопотребления и не учитывает существенную разницу в стоимости этих вариантов с учетом получаемого охвата. Рассмотрим по аналогии с (4.147) условие применения бустерного насоса по показателю удельной стоимости c_s (руб./га):

$$c_s = \frac{C_i}{S_i}, \quad (4.148)$$

где C_i – стоимость способа охвата полива, руб.

Условием применения бустерного насоса по показателю удельной стоимости будет неравенство:

$$l_{\text{н}} > l \sqrt{\frac{C_{\text{нас}}}{C_{\text{секции}}}}, \quad (4.149)$$

где $C_{\text{нас}}$ – суммарная стоимость оборудования и монтажных работ бустерного насоса с ДА, руб.; $C_{\text{секции}}$ – суммарная стоимость оборудования и монтажных работ секции, руб.

Применение бустерного насоса будет оправданным относительно удельной стоимости способов, например, если стоимость оборудования и монтажа насоса составляет $C_{\text{нас}} = 37$ тыс. руб., а дальность струи $l_{\text{н}}$ превышает 13,5 м по сравнению с секцией стоимостью $C_{\text{секции}} = 467$ тыс. руб. и с длиной трубопровода $l = 49$ м (точка *B* на рисунке 4.47). Если при этих же данных секции стоимость оборудования и монтажа насоса $C_{\text{нас}} < 10$ тыс. руб., то дальность струи ДА должна быть $l_{\text{н}} > 7,1$ м.

Другие удельные показатели (потребление энергии, надежность, обслуживание рассматриваемых способов и т. п.) могут быть рассчитаны аналогичным образом и значительно отличаться друг от друга. Поэтому рассмотрим условие применения бустерного насоса относительно показателя полных эксплуатационных затрат, рассчитанных на срок 10 лет с учетом капиталовложений (рисунк 4.48):

$$l_n > l \sqrt{\frac{Z_{\text{нас}}}{Z_{\text{секции}}}}, \quad (4.150)$$

где $Z_{\text{нас}}$ – полные эксплуатационные затраты бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА, руб./10 лет); $Z_{\text{секции}}$ – полные эксплуатационные затраты на секцию, руб./10 лет).

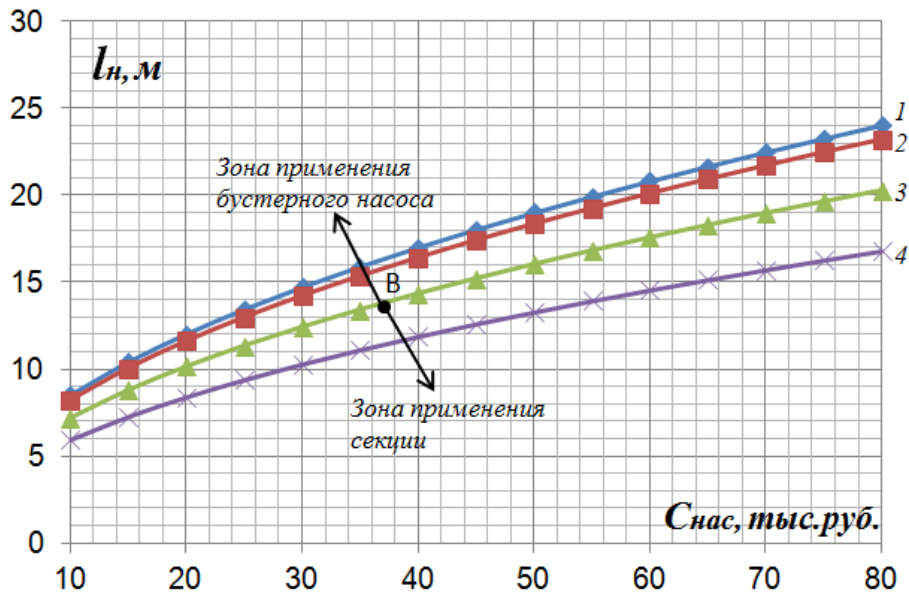


Рисунок 4.47 – Граница применения бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА при: 1 – $C_{\text{секции}} = 585$ тыс. руб., $l = 65$ м; 2 – $C_{\text{секции}} = 526$ тыс. руб., $l = 59,5$ м; 3 – $C_{\text{секции}} = 467$ тыс. руб., $l = 49$ м; 4 – $C_{\text{секции}} = 410$ тыс. руб., $l = 38$ м

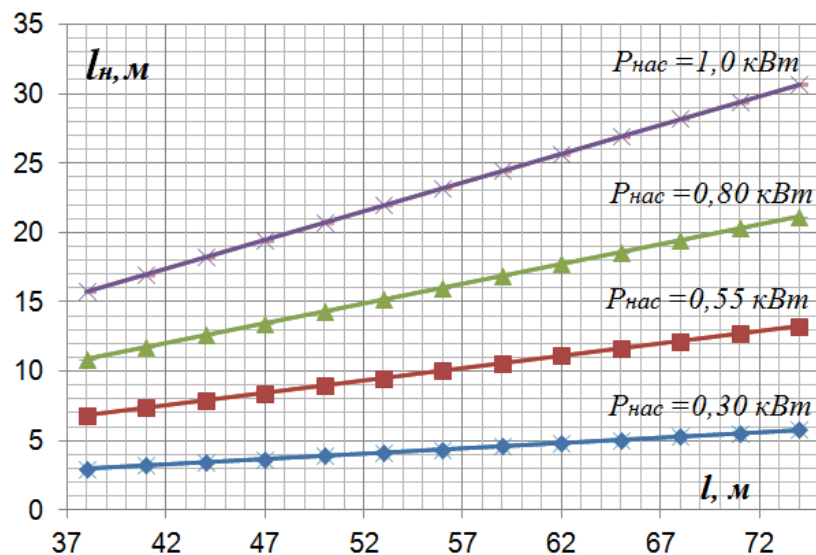


Рисунок 4.48 – Границы применения бустерного насоса с дальнеструйным аппаратом по критерию полных эксплуатационных затрат, рассчитанных на 10 лет эксплуатации ДМ

Однако несмотря на меньшую стоимость и меньшие эксплуатационные затраты бустерного насоса по сравнению с секцией, обеспечить дальность струи l_n по графику 4.47 в практических условиях невозможно с любым дальнеструйным аппаратом. С энергетических позиций оправданным будет применение секции. Это связано с тем, что мощность электродвигателя бустерного насоса пропорциональна дальности струи:

$$P_{\text{нас}} = \frac{k_{\text{зап}} \rho g Q_n H_n}{\eta_{\text{дв}} \eta_n \eta_{\text{пер}}}, \quad (4.151)$$

где $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса по мощности; Q_n – подача насоса (расход), м³/с; H_n – общий напор, создаваемый насосом, м; $\eta_{\text{дв}}$, η_n , $\eta_{\text{пер}}$ – КПД электродвигателя, насоса и передачи.

Напор, создаваемый бустерным насосом, согласно [187]:

$$H_n = \frac{l_n}{2 - \frac{l_n}{2d_{\text{ДА}} 10^3}}, \quad (4.152)$$

где $d_{\text{ДА}}$ – внутренний диаметр насадки дальнеструйного аппарата, м.

Если обозначить подачу насоса через гидромодуль дождевальной машины (выражение (2.1)) и подставить выражение (4.152) в (4.151), то мощность насоса:

$$P_{\text{нас}} = \frac{b_n k_{\text{зап}} \rho g q \pi l_n^3}{\eta_{\text{дв}} \eta_n \eta_{\text{пер}} \left(2 - \frac{l_n}{2d_{\text{ДА}} 10^3} \right)}, \quad (4.153)$$

где q – гидромодуль ДМ, м³/(м²·с).

Согласно выражению (4.151), для дальности струи ДА $l_n > 42$ м необходима мощность $P_{\text{нас}} > 7,76$ кВт ($b_n = 17$, $k_{\text{зап}} = 1,2$; $q = 10^{-7}$ м³/(м²·с); $d_{\text{ДА}} = 0,02$ м). Поэтому рассмотрим применение бустерного насоса, установленного на консольном трубопроводе длиной $l_{\text{конс}}$, по сравнению с секцией (рисунок 4.49).

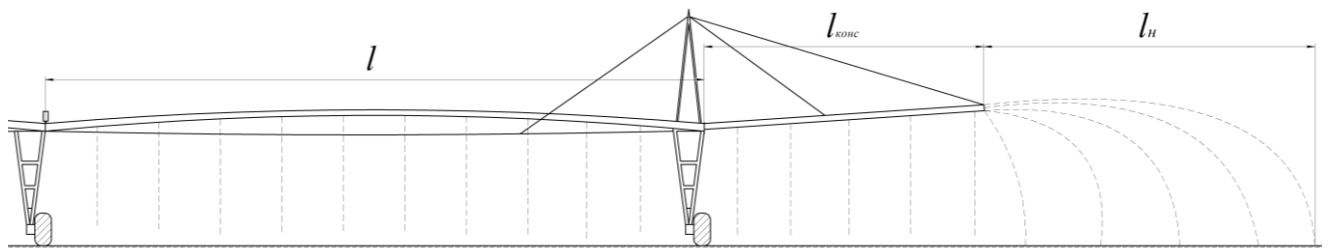


Рисунок 4.49 – Охват поливной площади консольным трубопроводом и бустерным насосом

Консольный трубопровод позволяет увеличить площадь охвата и снизить нагрузку электропривода бустерного насоса. Тогда с учетом длины консольного трубопровода условие (4.147) примет вид:

$$\frac{P_{\text{нас}}}{l_{\text{н}}^2} < \frac{P_{\text{двГ1}}}{(l - l_{\text{конс}})^2}, \quad (4.154)$$

где $l_{\text{конс}}$ – длина консольного трубопровода, м.

Примем:

$$l_{\text{конс}} = f_{\text{конс}} l, \quad (4.155)$$

где $f_{\text{конс}}$ – коэффициент, показывающий отношение длины консольного трубопровода к длине трубопровода секции.

После преобразования с учетом (4.143) и (4.155) выражение (4.154) примет вид:

$$a_{\text{н}} > (1 - f_{\text{конс}}) \sqrt{\frac{P_{\text{нас}}}{P_{\text{двГ1}}}}. \quad (4.156)$$

Выразим мощность электродвигателя бустерного насоса:

$$P_{\text{нас}} < \frac{P_{\text{двГ1}} a_{\text{н}}^2}{(1 - f_{\text{конс}})^2}. \quad (4.157)$$

При длине консольного трубопровода 50 % от длины трубопровода секции на рисунке 4.50 буквами a , b , c обозначены границы применения бустерного насоса при различной длине секции – соответственно 49,5 м; 59,0; 65,0 м. Цифрами 1, 2, 3 указана зависимость мощности электродвигателя насоса от дальности струи $l_{\text{н}}$ для дождевальных машин, состоящих соответственно из 5, 7, 9 секций ($b_{n5} = 11$; $b_{n7} = 15$; $b_{n9} = 17$). Пересечение границ a , b , c и графиков 1, 2, 3 определяет зоны применения бустерного насоса.

Например, для трубопровода секции длиной 49,5 м ДМ, состоящей из 5 секций, применение бустерного насоса будет оправданным, если длина консольного трубопровода $l_{\text{конс}} = 0,5l = 24,75$ м, а дальность струи ДА, создаваемой бустерным насосом, будет меньше 13,5 м (точка F на рисунке 4.50). Если же при тех же данных ДМ будет состоять из 7 секций, то зона применения сокращается, а дальность струи должна быть меньше 10,0 м (точка D на рисунке 4.50). У ДМ, состоящей из

9 секций, зона применения бустерного насоса также сокращается с $l_n < 7,7$ м (точка E на рисунке 4.50). Для ДМ с большей длиной трубопровода секции зоны применения бустерного насоса значительно меньше.

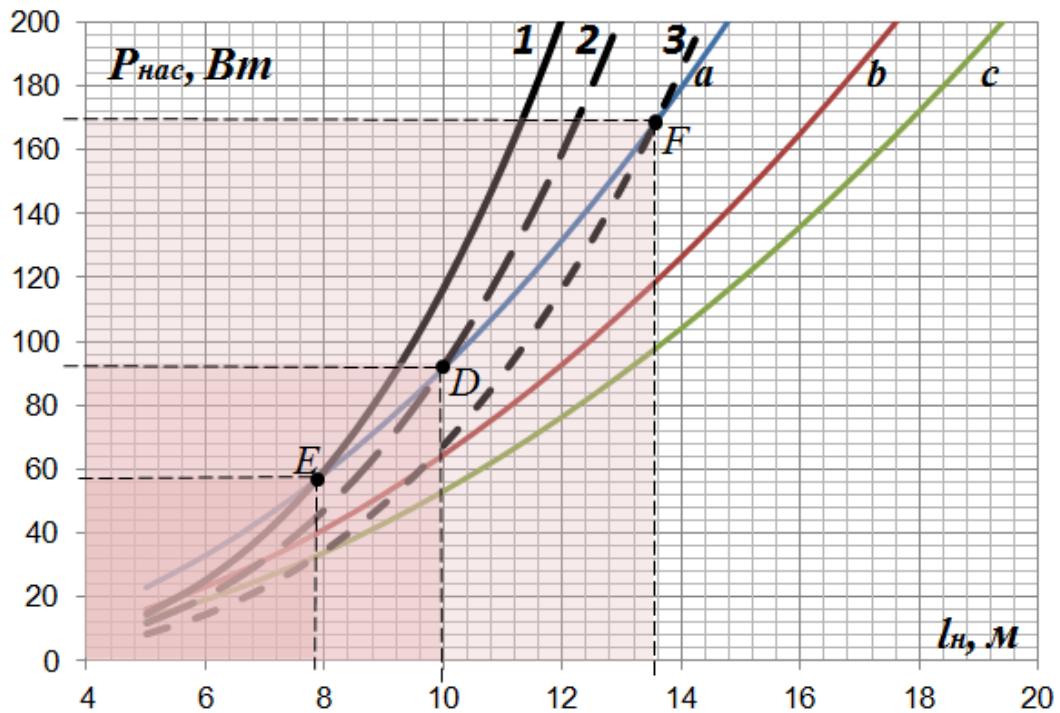


Рисунок 4.50 – Зоны применения бустерного насоса при длине трубопровода консоли $l_{конс} = 0,5l$: 1 – ДМ состоит из 9 секций ($b_n = 17$); 2 – ДМ состоит из 7 секций ($b_n = 15$); 3 – ДМ состоит из 5 секций ($b_n = 11$); a – длина трубопровода секции $l = 49,5$ м; b – длина трубопровода секции $l = 59$ м; c – длина трубопровода секции $l = 65$ м

При тех же параметрах сравнения, если длина консольного трубопровода составляет 70 % от длины трубопровода секции (рисунок 4.51), зона применения бустерного насоса расширяется. Для ДМ, состоящей из 9 секций с длиной трубопровода секции 59 м и консольным трубопроводом длиной $l_{конс} = 0,7l = 41,3$ м, применение бустерного насоса будет оправданным с $l_n < 15,7$ м (точка G на рисунке 4.51).

Однако параметры консольного трубопровода (длина, диаметр и толщина стенки) будут формировать суммарную нагрузку электропривода опорной тележки предпоследней секции. Поэтому полученные данные применения бустерного насоса определены с некоторым допущением для электродвигателя мощностью 550 Вт. Дальнейшее исследование требует детального учета параметров консольного трубопровода.

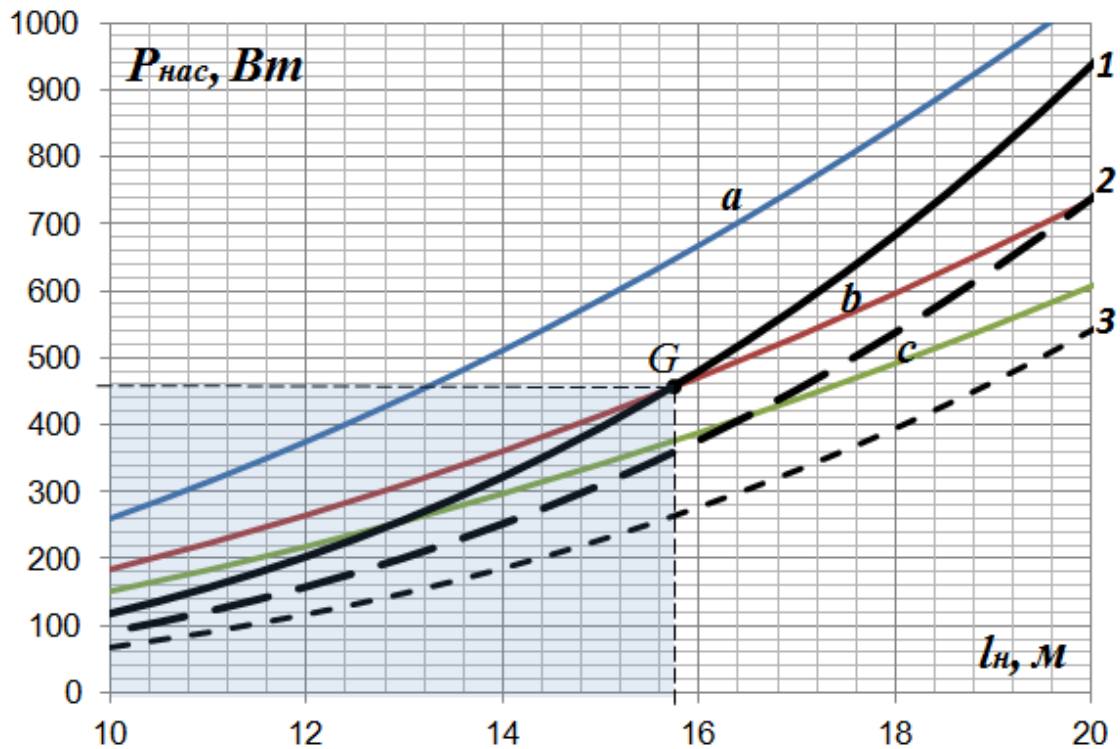


Рисунок 4.51 – Зоны применения бустерного насоса при длине трубопровода консоли $l_{конс} = 0,7l$: 1 – ДМ состоит из 9 секций ($b_n = 17$); 2 – ДМ состоит из 7 секций ($b_n = 15$); 3 – ДМ состоит из 5 секций ($b_n = 11$); a – длина трубопровода секции $l = 49,5$ м; b – длина трубопровода секции $l = 59$ м; c – длина трубопровода секции $l = 65$ м

Таким образом, применение бустерного насоса с электроприводом и дальнеструйным ДА зависит от показателей удельных энергетических затрат, удельной стоимости оборудования и монтажа, надежности, стоимости и состава работ по обслуживанию, а также от мощности электродвигателя насоса и дальности струи дождевального аппарата. Применение бустерного насоса является оправданным только при использовании консольного трубопровода, длина которого должна соответствовать условию $l_{конс} > 0,5l$. Зона применения бустерного насоса также зависит от количества секций ДМ.

4.5 Разработка технических средств повышения энергетической эффективности

В устройстве, управлении и защите электроприводов используют различные схемы и средства для их нормальной эксплуатации, без которых нельзя обойтись. Как было показано на принципиальной электрической схеме устройства управления (см. рисунок 4.30), проводники и преобразователи характеризуются сопро-

тивлением и, соответственно, затратами энергии на выполнение тех или иных функций. Поэтому совершенствование функционала, разработка энергосберегающих средств или повышение энергетической эффективности направлены на достижение цели работы, что выражается условием:

$$W_{\text{сущ}} > W_{\text{разраб}}, \quad (4.158)$$

где $W_{\text{сущ}}$ и $W_{\text{разраб}}$ – энергопотребление существующих и разрабатываемых технических средств, кВт·ч.

Рассмотрим несколько вариантов снижения энергопотребления в электрифицированных дождевальными машинах, работающих как на постоянном, так и на переменном токе.

4.5.1 Разработка устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей

Дождевальные машины, работающие в условиях эксплуатации, оптимальных для систем энергоснабжения с источниками переменного тока (переносной генератор, кабельная линия и т. п.), комплектуют электродвигателями переменного тока. Они характеризуются потреблением как активной, так и реактивной мощности, что выражается показателем $\cos \varphi$ (коэффициент мощности). Реактивная мощность затрачивается на создание магнитного поля. В источниках [117, 138, 167, 194, 205, 209, 252, 264, 265, 311, 317] приведены способы компенсации реактивной мощности (РМ), использование которых никак не отражается на работе двигателей. Однако это дает эффект снижения потерь электроэнергии в линиях электропередач и источника.

В дождевальных машинах с традиционным источником питания трехфазного переменного тока (воздушная или кабельная линия, переносной генератор), применяют устройства компенсации как для электродвигателей, так и для устройств управления (магнитных пускателей) [233]. Однако эти устройства рассчитаны на номинальные режимы работы электроприемников. В динамическом режиме при пуске или других коммутационных действиях автоматики этих устройств не достаточно.

Динамический режим пуска электродвигателя (ЭД) описывают так, что в момент подачи напряжения возникает пусковой ток, который в 5–7 раз превышает номинальный [264–267], и в течение короткого промежутка времени он постепенно снижается (рисунок 4.52).

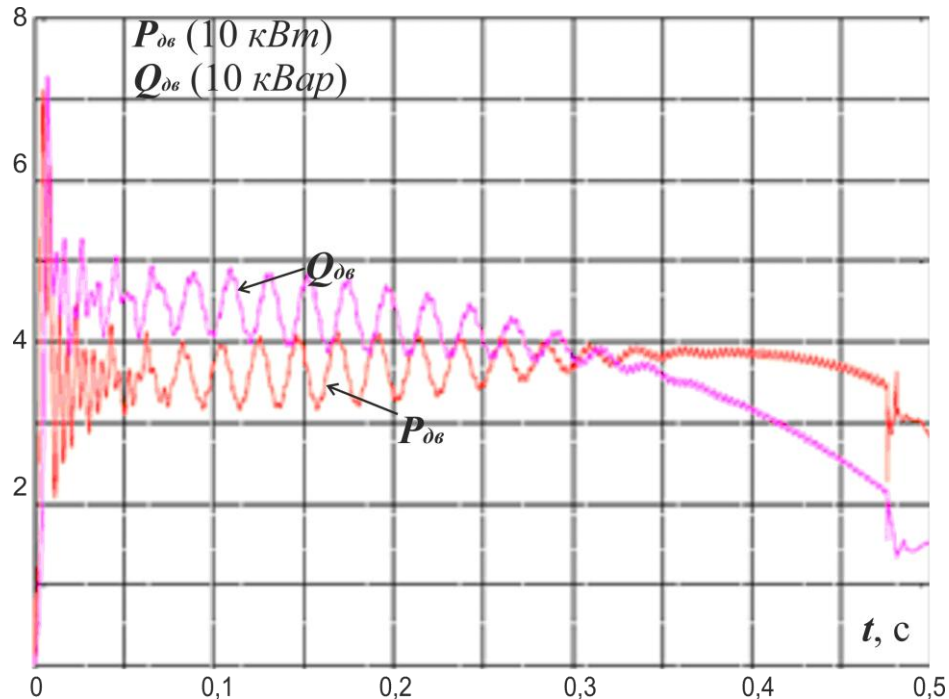


Рисунок 4.52 – Осциллограмма пускового режима электродвигателя без нагрузки в программе MatLab Simulink

Такие режимы запуска наблюдаются у всех электродвигателей. Обычно ими можно пренебречь, когда электродвигатель работает в продолжительном режиме. Однако для ДМ динамический режим запусков ЭД выполняется часто, ускоряя износ контактных соединений, снижая сопротивление изоляции и повышая потребление энергии [117, 252, 264–267].

Особенность работы ДМ состоит в том, что электроприводы опорных тележек секций включены в повторно-кратковременном режиме. Благодаря этому режиму можно перемещать водопроводящий трубопровод соединенных секций в виде прямой линии без излома. Ход ДМ задается режимным реле электропривода крайней секции. Продолжительность цикла в среднем составляет 100 с [147–152]. Анализ работы ДМ, состоящей из шести секций, показал, что в течение данного цикла работы электропривода крайней секции происходит 4–7 запусков электроприводов проме-

жуточных секций при ПВ = 50 % и 8–11 запусков при ПВ = 80 %. Тогда общее число запусков электроприводов за 12 ч работы ДМ составит около 2–4 тыс. раз.

Пусковой режим асинхронных электродвигателей неблагоприятно воздействует на источник энергии пусковыми токами, которые в 5–7 раз превышают номинальные токи. Также продолжительность пуска может влиять на провал напряжения сети. Если ДМ имеет в качестве источника питания переносной генератор, то такие режимы увеличивают расход топлива на 8–20 %, несмотря на незначительную продолжительность пуска (0,1...3,0 с).

В совокупности действия данных параметров (число пусков, кратность пускового тока, продолжительность пуска) следует оценить величину потребления электроэнергии переходного (динамического) режима.

Общее количество электроэнергии, потребляемое электроприводом j -й секции ДМ, определяется в соответствии с выражением (4.99):

$$W_j = W_{hj} + W_{pj} = P_{\text{ном}} t_{\text{рн}} + w P_{\text{п}} t_{\text{п}}, \quad (4.159)$$

где W_{hj} и W_{pj} – соответственно величины энергии номинального и пускового режимов, кВт·ч; $P_{\text{п}}$ – пусковая мощность электродвигателя, Вт; $t_{\text{п}}$ – продолжительность пуска, ч; w – количество пусков; $P_{\text{ном}}$ – потребляемая мощность в номинальном режиме, Вт; $t_{\text{рн}}$ – продолжительность номинального режима, ч.

Номинальную и пусковую мощности можно записать согласно [316, 317]:

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{н}}; \quad (4.160)$$

$$P_{\text{п}} = U_{\text{ном}} I_{\text{п}} \cos \varphi_{\text{п}} = k_{\text{пуск}} U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{п}}, \quad (4.161)$$

где $I_{\text{п}}$, $I_{\text{ном}}$ – соответственно пусковой и номинальный ток, А; $k_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, В; $\cos \varphi_{\text{н}}$ и $\cos \varphi_{\text{п}}$ – соответственно значения коэффициентов мощности в номинальном и пусковом режимах.

Оценим долю энергии на пуск:

$$\frac{W_{pj}}{W_{hj}} = \frac{w P_{\text{п}} t_{\text{п}}}{P_{\text{ном}} t_{\text{рн}}}. \quad (4.162)$$

С учетом выражений (4.160)–(4.161) получим:

$$\frac{W_{пj}}{W_{пj}} = \frac{wk_{\text{пуск}} \cos \varphi_{п} t_{п}}{\cos \varphi_{п} t_{пн}}. \quad (4.163)$$

Анализ выражения (4.163) показывает, что количество пусков 2–4 тыс. раз оказывает существенное влияние на потребление энергии. Для детального учета энергопотребления пускового режима рассмотрим зависимость числа и продолжительности пусков в соответствии с рабочим процессом дождевальной машины.

Определим среднее количество пусков, временные диапазоны циклов электропривода для дождевальной машины кругового действия, состоящей из 10 секций, в режимах работы электропривода крайней секции ПВ = 100 %. Повторное включение электропривода крайней секции определяет режим работы остальных электроприводов.

При ПВ = 100 % электропривод крайней секции работает непрерывно в продолжительном режиме. Продолжительность его работы определяется отношением пройденного пути и линейной скорости перемещения крайней опорной тележки:

$$t_{пнj} = \frac{2\pi jl}{v_{от}}, \quad (4.164)$$

где j – количество секций ДМ, шт.; l – длина трубопровода одной секции, м (принято, что все секции одинаковы).

Опорная тележка предыдущей секции геометрически проходит меньший путь. При одинаковой линейной скорости опорных тележек (принято, что все электроприводы опорных тележек имеют одинаковые параметры) и движении по кругу предыдущая тележка всегда будет опережать последующую (крайнюю). Согласно настройкам электромеханического прибора синхронизации движения в линию и рекомендациям [147–152, 231], опережение в диапазоне образованного угла между продолжениями трубопроводов рассматриваемых тележек более чем на $2,0^\circ \dots 2,5^\circ$ блокируется. Прибор ПСЛ отключает питание электропривода предыдущей тележки.

Согласно этим данным, предыдущая опорная тележка, проезжая участок s_{j-1} , останавливается и стоит до тех пор, пока последующая опорная тележка ее не догонит:

$$s_{j-1} = \frac{2\pi(j-1)l\varphi}{360^\circ}, \quad (4.165)$$

где φ – предельный угол излома между продолжениями предыдущего и последующего трубопровода опорных тележек соседних секций, $\varphi = 2,0^\circ \dots 2,5^\circ$.

Тогда можно определить количество пусков электропривода предыдущей опорной тележки:

$$w_{j-1} = w_j + \frac{2\pi j l 360^\circ}{2\pi(j-1)l\varphi} = w_j + \frac{j360^\circ}{(j-1)\varphi}, \quad (4.166)$$

где w_j – количество пусков электропривода опорной тележки крайней секции, при ПВ = 100 % $w_j = 1$.

Аналогично можно рассчитать число пусков других электроприводов опорных тележек промежуточных секций ДМ. Изобразим графическое решение расчета числа пусков для 10 секций ДМ при ПВ = 100 % (рисунок 4.53).

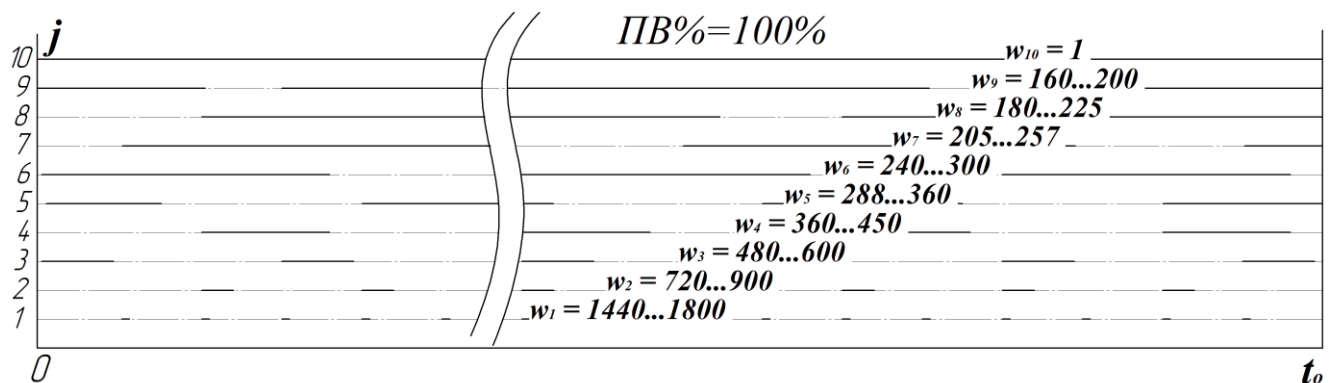


Рисунок 4.53 – Число пусков электропривода каждой секции за один полный оборот дождевальная машины t_0

Общее число пусков для ПВ = 100 % составит 4073...5092. При этом наблюдается малая продолжительность работы электропривода в нормальном режиме у ближайших к неподвижной опоре секций. Например, при длине трубопровода секции 59 м, линейной скорости перемещения опорной тележки 2,6 м/мин продолжительность работы первой секции за один оборот машины:

$$t_{\text{пн1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 59}{2,6} = 142,5 \text{ мин} = 8550,5 \text{ с.} \quad (4.167)$$

Если за время движения первой секции число пусков 1600 раз, то продолжительность работы электропривода между паузами:

$$t_{\text{рвкл1}} = \frac{8550,5}{1600} = 5,34 \text{ с.} \quad (4.168)$$

С учетом данных, полученных по выражению (4.163), доля энергопотребления на пуск для первой секции будет в несколько раз превышать потребление энергии на нормальную работу электропривода (рисунок 4.54).

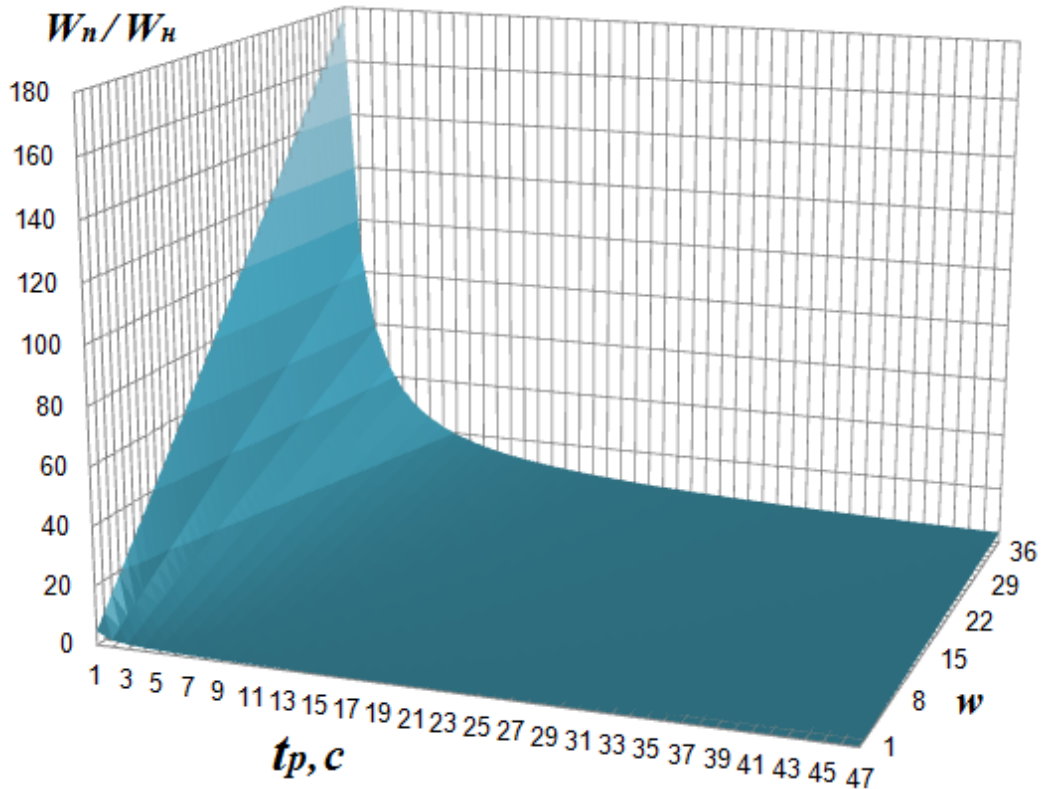


Рисунок 4.54 – Изменение отношения потребления пусковой энергии к энергии, потребляемой в нормальном режиме, в зависимости от числа пусков и продолжительности работы электропривода при условии: $k_{\text{пуск}} = 7$; $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,86$; $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,2$; $t_{\text{п}} = 2 \text{ с}$

Для каждой опорной тележки число пусков изменяется в соответствии с порядковым номером. Также будет изменяться продолжительность работы $t_{\text{р}}$. С учетом этого доля затрат энергии на пуск для каждого электропривода будет индивидуальной (рисунок 4.55). Это зависит от продолжительности работы электропривода секции и числа пусков (см. рисунок 4.55). За один полный оборот дождевальной машины результирующая доля энергии, потребляемая на пуск, в 200 раз превышает энергию, потребляемую в период нормальной работы.

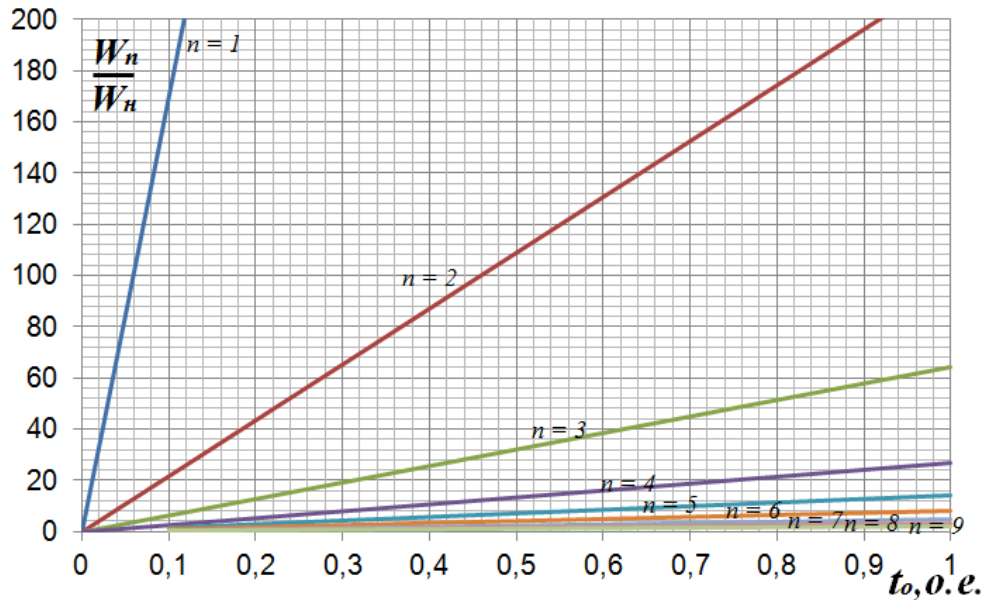


Рисунок 4.55 – Изменение отношения потребления пусковой энергии к энергии, потребляемой в нормальном режиме, электроприводов каждой опорной тележки ДМ, состоящей из 10 секций, за один полный оборот t_o при условии: $k_{\text{пуск}} = 7$; $\cos \varphi_n = 0,86$; $\cos \varphi_n = 0,2$; $t_n = 2$ с

Однако согласно [264], повлиять на потребление энергии электродвигателя нельзя, так как его электромеханическая система имеет детерминированные значения параметров. В этом случае можно уменьшить потребление энергии технологического процесса в целом за счет снижения потерь энергии в линии.

Потери энергии в линии определяют по закону Джоуля – Ленца [264]. В момент пуска количество энергии, потребляемой нагрузкой, можно рассчитать по формуле:

$$W_{\text{п}} = \frac{wkI^2 R t_{\text{п}}}{3600}, \quad (4.169)$$

где R – активное сопротивление нагрузки, включая сопротивление сети, Ом; $t_{\text{п}}$ – продолжительность пуска, с; I – полный ток в цепи нагрузки, А:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}, \quad (4.170)$$

где I_a – сила тока, обусловленная активным сопротивлением, А; I_r – сила тока, обусловленная реактивным сопротивлением, А.

Параллельное включение конденсаторов в цепь питания электродвигателя позволяет снизить величину полного тока сети (рисунок 4.56). Согласно [264], это выполнимо при условии резонанса токов и равных реактивных проводимостей батареи конденсаторов и обмотки электродвигателя.

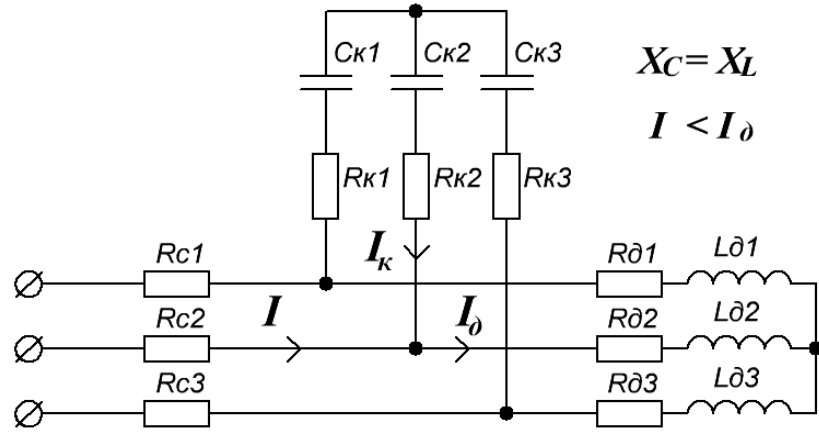


Рисунок 4.56 – Упрощенная схема замещения цепи питания электродвигателя и конденсаторной батареи от сети: R_C – активное сопротивление сети, Ом; C_K – емкость конденсатора, Ф; R_K – активное сопротивление проводов, Ом; L_d – индуктивность обмотки электродвигателя, Гн; R_d – активное сопротивление обмотки электродвигателя, Ом; X_C и X_L – реактивные сопротивления соответственно конденсаторной батареи и обмотки электродвигателя, Ом; I , I_d , I_k – соответственно токи сети, электродвигателя и конденсаторной батареи, А

Доля снижения потребления энергии пусковых режимов:

$$\Delta W_n = 1 - \frac{\cos \varphi_n (R_C + R_K)}{R_C} \quad (4.171)$$

В результате проведенных исследований установлен диапазон снижения потребления энергии на пуск в 1,2–5,1 раза (рисунок 4.57).

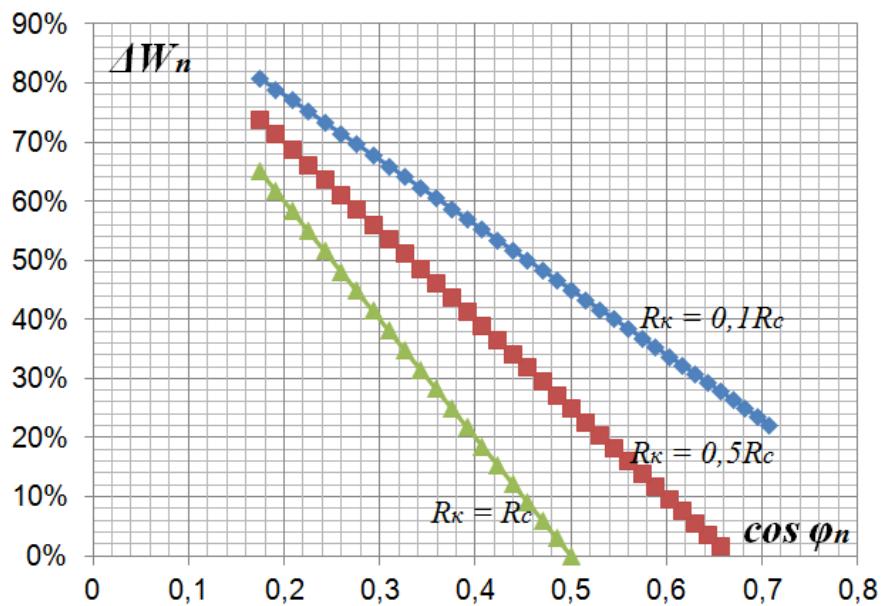


Рисунок 4.57 – Доля снижения потребления энергии на пуск

Таким образом, снизить влияние пускового режима на источник и общее потребление электроэнергии возможно путем разработки схем устройства динамической компенсации реактивной мощности.

Рассмотрим устройство компенсации реактивной мощности (РМ) электродвигателей дождевальная машины в динамическом режиме. Контролировать продолжительность запуска (т. е. включение и отключение устройства компенсации РМ на полярных электролитических конденсаторах) можно различными способами [8, 23, 41, 133, 135, 314]. Принцип работы таких конденсаторов изложен в трудах [117, 128], где описана возможность их использования в цепях переменного тока с указанием тепловых характеристик и схем включения.

Способы управления конденсаторной батареи:

- включение через реле времени с регулированием диапазона работы устройства;
- тиристорной схемой включения, реагирующей на превышение тока в цепи.

Рассмотрим включение устройства динамической компенсации с включением через тиристорную схему (рисунок 4.58).

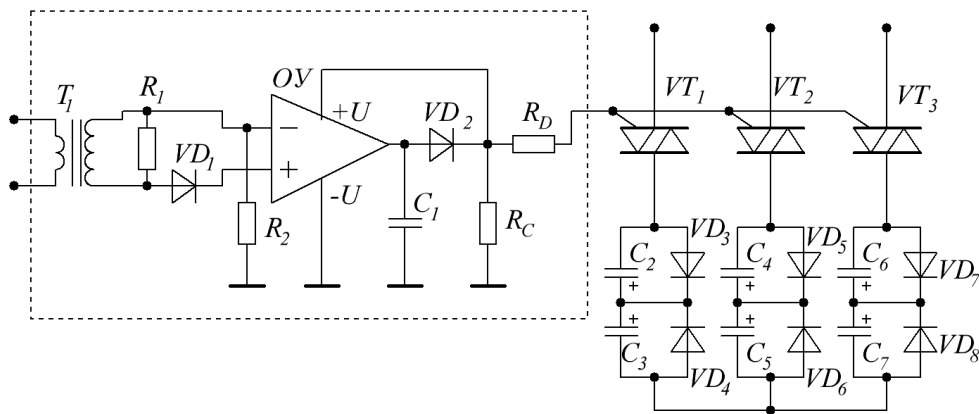


Рисунок 4.58 – Схема включения устройства динамической компенсации реактивной мощности с помощью тиристорного пускателя: VT_{1-3} – тиристорный пускатель; C_{2-7} – полярные электролитические конденсаторы; VD_{1-8} – выпрямительные диоды; R_{1-2} ; C_1 – балластные сопротивления схемы; OY – компаратор

Чувствительным элементом схемы является маломощный понижающий трансформатор T_1 , выводы которого подключены к двум любым фазам, питающим электродвигатель. При номинальном значении тока в фазах вся мощность во вторичной обмотке трансформатора T_1 преобразуется в резисторе с сопротивле-

нием R_1 . При пусковом токе двигателя компаратором формируется импульс выходного напряжения на сопротивлениях R_C и R_D , которые рассчитаны на падение напряжения, что позволяет подать сигнал на управляемый вывод тиристорного пускателя [19, 10, 21, 41, 46, 135, 232, 283, 329].

Также рассмотрим схему включения устройства динамической компенсации реактивной мощности через реле времени (рисунок 4.59).

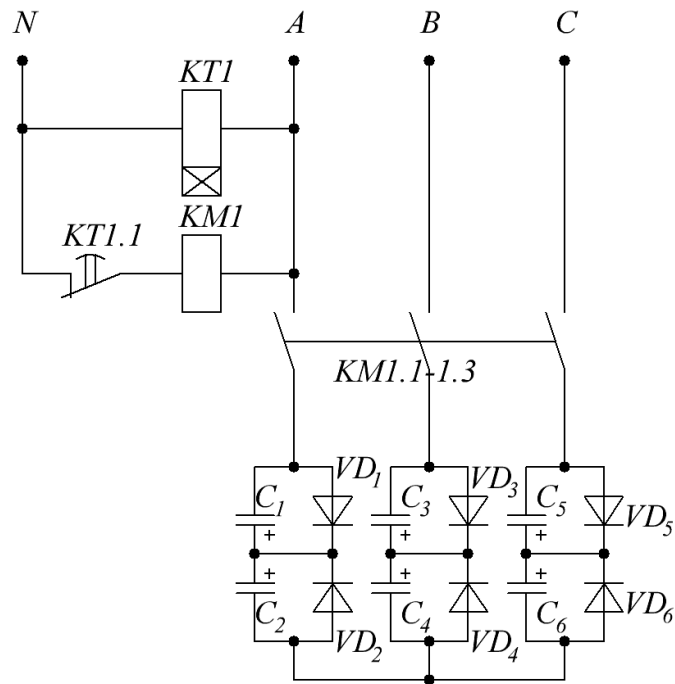


Рисунок 4.59 – Схема включения устройства динамической компенсации реактивной мощности с помощью реле времени с задержкой отсечки по установленному значению: KMI , $KMI.1-1.3$ – катушка и контакты магнитного пускателя; $KT1$, $KT1.1$ – реле времени и его размыкающий контакт

Представленные схемы включения динамической компенсации обладают разными свойствами энергопотребления:

$$W_{VT} = b_{cx} W_{KT}, \quad (4.172)$$

где b_{cx} – коэффициент соотношения схем управления включения устройства динамической компенсации реактивной мощности (УДКРМ), для рассматриваемых вариантов $b_{cx} = 1,7 \dots 2,1$.

Тогда затраты энергии пусковых режимов можно снизить на величину:

$$\Delta W_{II} = 1 - \frac{W_{KT}}{W_{II6}}, \quad (4.173)$$

где $W_{Пб}$ – затраты энергии пусковых режимов без устройства компенсации, кВт·ч.

Таким образом, устройство динамической компенсации реактивной мощности позволяет снизить действие пусковых токов на источник электроэнергии и уменьшить энергопотребление на запуск на 14,5–80,4 %, энергопотребление водораспределения – на 8,1–36,2 %, а общее энергопотребление полива на 0,32–2,53 %. Более подробно исследуем это далее.

4.5.2 Разработка систем управления дождевальной машины

Адаптивная система автоматического регулирования мгновенной мощности электропривода опорных тележек

Нагрузка на электропривод опорной тележки формируется в зависимости от положения ДМ. Очевидно, что при движении опорных тележек в гору нагрузка будет больше, чем при движении со склона горы (рисунок 4.60, а). В составе ДМ отдельные тележки могут быть в положении увеличенной и сниженной нагрузки (рисунок 4.60, б).

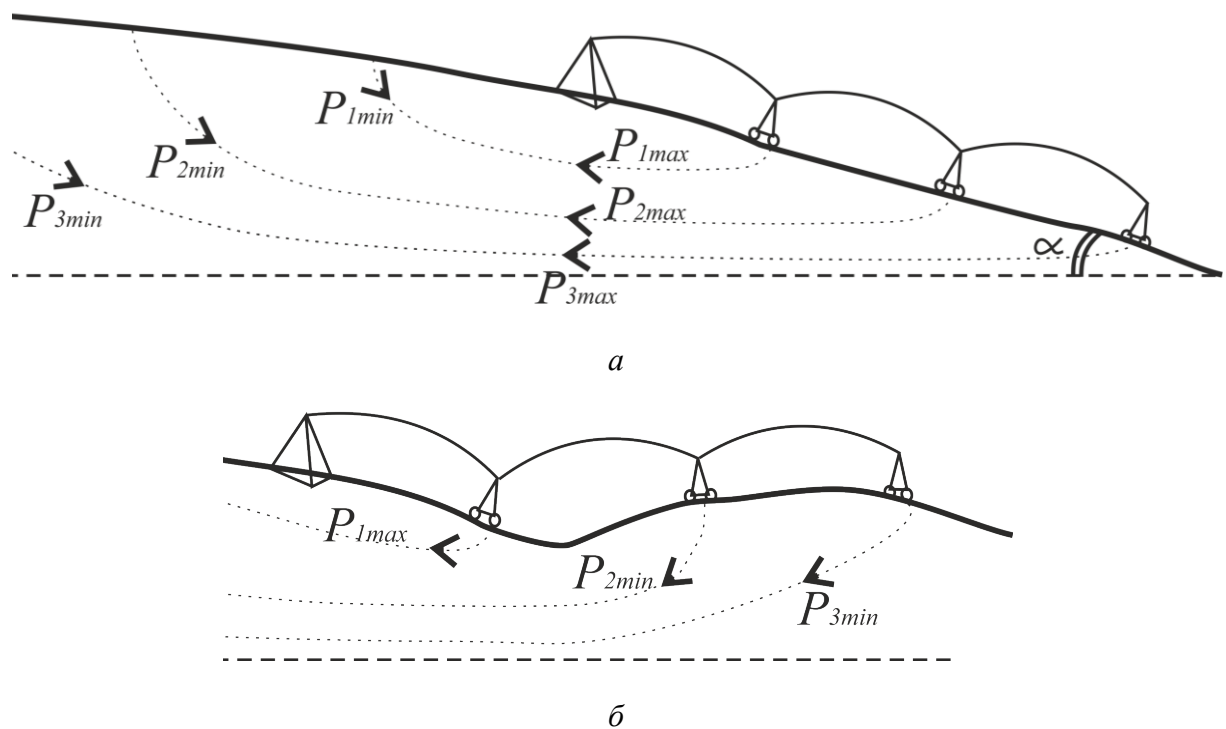


Рисунок 4.60 – Движение ДМ на площади с неровным рельефом

Вместе с этим при увлажнении грунта коэффициент сцепления в выражении (4.6) будет уменьшаться до минимального значения, тем самым снижая момент сопротивления качению.

Изменение момента сопротивления качению сопровождается пропорциональными изменениями потребляемой мгновенной мощности электропривода опорных тележек в диапазоне от $P_{двГ1-min}$ до $P_{двГ1-max}$. На практике ориентируются на предельную максимальную нагрузку, чтобы в любом положении обеспечить поступательное движение ДМ. Однако в моменты сниженной нагрузки избыток потребляемой электроэнергии для аккумуляторного источника питания приводит к уменьшению разрядной емкости и, соответственно, к сокращению продолжительности работы электропривода t_p .

Таким образом, разработка адаптивных систем управления потребляемой мгновенной мощностью электропривода в соответствии с нагрузкой позволит повысить энергетическую эффективность полива.

Варьировать потребление энергии аккумуляторным источником питания можно путем изменения продолжительности работы электропривода или мгновенной потребляемой им мощности. Изменение потребляемой мощности можно обеспечить путем изменения величины напряжения или длительности питающего импульса напряжения (например, на основе широтно-импульсного регулирования) [26, 43, 50, 78, 79, 123, 186, 251, 266, 319].

Принцип работы широтно-импульсного регулятора широко известен [50, 79, 186]. Регулирование открытия полевого транзистора могут выполнять операционные усилители [78, 123, 186] или интегральные микросхемы, позволяющие формировать временной диапазон с задержкой обработки сигнала не более 20 мкс. Более простая схема регулирования может быть на базе твердотельных реле [50, 186] (рисунок 4.61).

Напряжение питающего импульса твердотельным реле не регулируется и ограничено значением напряжения аккумуляторной батареи. Длительность импульса может быть задана вручную настройками задающего генератора импульсов на входных выводах твердотельного реле и с помощью датчиков и программируемого логического контроллера (ПЛК). В качестве датчика обратной связи

можно использовать шунтовое сопротивление, на основе которого фиксировать значения изменения токов нагрузки и, соответственно, потребляемой мощности в промежутке времени.

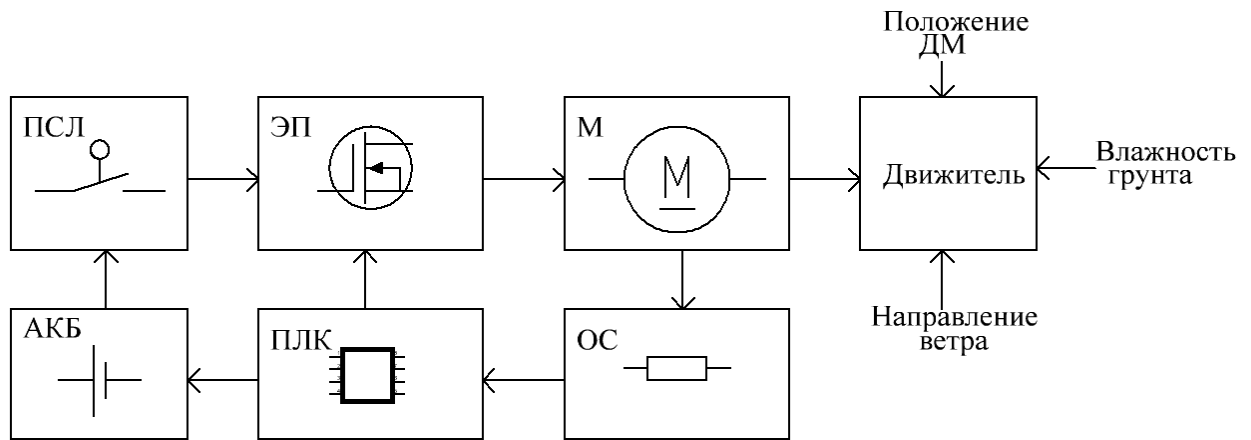


Рисунок 4.61 – Структурная блок-схема системы автоматического регулирования мгновенной мощности электропривода: ЭП – электрический преобразователь на основе твердотельного реле; М – электропривод; ОС – обратная связь; ПСЛ – прибор синхронизации движения в линию; ПЛК – программируемый логический контроллер

Однако для работы данной системы необходимо разработать чувствительный элемент обратной связи, который позволит получать информацию об изменении нагрузки (положение ДМ на рельефе перемещения, определяющее момент сопротивления качению колес, влажность грунта, определяющая коэффициент сцепления колес с грунтом, направление ветра и т. д.). Преобразуя информацию, поступающую от чувствительного элемента, с помощью ПЛК можно сформировать управляющие сигналы твердотельного реле для изменения потребляемой мгновенной мощности электропривода. Рассмотрим такое регулирование при движении одной опорной тележки дождевальная машины.

Значение момента сопротивления качению колес M_C в каждый промежуток времени будет изменяться в соответствии с действием факторов, указанных на рисунке 4.61. Мощность на валу также будет изменяться. Потребляемая мгновенная мощность электродвигателя будет определяться значением фактического напряжения на зажимах и мгновенным значением тока, протекающего по обмоткам.

Задаваясь минимальным начальным значением $U_{ЭД-\min}$, величина которого определяется из минимально возможной потребляемой мощности $P_{двТ1-\min}$, необ-

ходимо фиксировать изменение тока в коротком промежутке времени. При его изменении в большую сторону $\Delta I > 0,05$ мА (на аналоговом токовом входе ПЛК [186]) следует увеличивать напряжение на зажимах на одну ступень $\Delta U_{Эд}$ (на аналоговом выходе ПЛК) с помощью увеличения входного сигнала на твердотельном реле. Далее повторять измерения увеличения тока в обмотках двигателя и увеличивать напряжение $\Delta U_{Эд}$ до тех пор, пока оно не будет соответствовать условию $0 < \Delta I < 0,05$ мА, при котором устанавливается оптимальное значение потребляемой мощности при соответствующей нагрузке. В случае непрерывного измерения тока, когда $\Delta I = 0$, следует уменьшать напряжение на величину ступени $\Delta U_{Эд}$. Схема соединений аккумуляторной батареи, электродвигателя и устройств управления с учетом изменяющейся в процессе движения ДМ условий показана на рисунке 4.62.

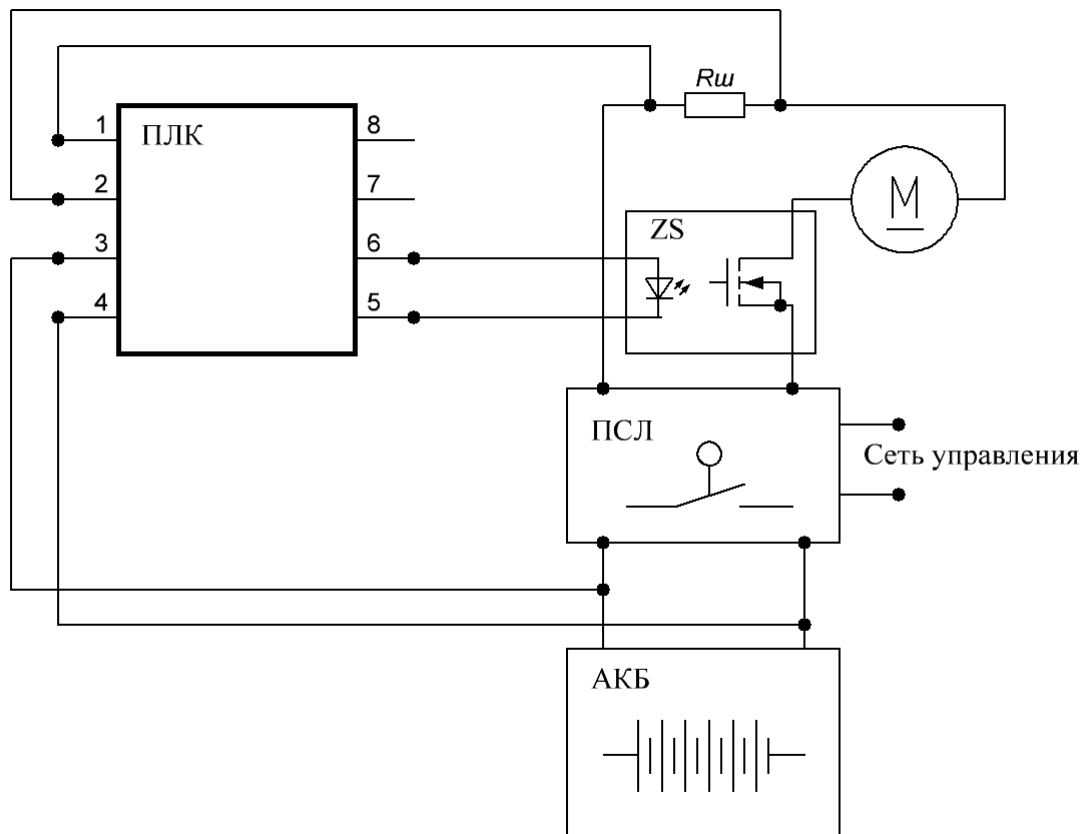


Рисунок 4.62 – Схема электрических соединений АКБ, электродвигателя M и устройств управления: 3–4 – выводы питания ПЛК; 1–2 – аналоговые входы ПЛК; 5–6 – аналоговые выходы ПЛК; $R_{ш}$ – шунтовый резистор (линейное сопротивление); ZS – твердотельное реле $DC-DC$

Изменение тока на линейном шунтовом резисторе $R_{ш}$ фиксируется программируемым логическим контроллером (ПЛК), который изменяет входное напряжение на твердотельном реле, тем самым изменяя напряжение на зажимах

электродвигателя постоянного тока непосредственно при движении опорной тележки. При этом программируемый логический контроллер обеспечивает следующий алгоритм работы.

1. Если ток в обмотках электродвигателя возрастает при минимальном заданном начальном напряжении на зажимах $U_{\text{ЭД-мин}}$ за промежуток времени Δt :

$$I_{t_2} > I_{t_1} (di(dt) > 0), \quad (4.174)$$

где I_{t_2} и I_{t_1} – значения тока в обмотках электродвигателя соответственно в моменты времени t_2 и t_1 , А,

то напряжение на зажимах электродвигателя увеличивается на величину $\Delta U_{\text{ЭД}}$, и алгоритм повторяется до тех пор, пока ток не перестанет расти, а его значение будет принадлежать диапазону:

$$0 < di(dt) < 0,05 \text{ мА}. \quad (4.175)$$

2. Если же ток в обмотках электродвигателя не изменяется или уменьшается:

$$di(dt) \leq 0, \quad (4.176)$$

то напряжение на зажимах электродвигателя уменьшается на величину $\Delta U_{\text{ЭД}}$, и алгоритм повторяется до тех пор, пока ток не будет соответствовать условию (4.175).

Интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$ между измерениями тока можно регулировать. Чем он меньше, тем чувствительней система и тем выше энергетическая эффективность управления дождевальными машинами. Временная диаграмма токов, напряжений и мгновенной мощности представлена на рисунке 4.63.

Для более детального учета потребляемой мгновенной мощности необходимо учитывать переходные процессы срабатывания устройств, интервалы времени обработки сигналов, чувствительность оборудования. На данном этапе можно оценить диапазон снижения энергопотребления дождевальной машины с использованием адаптивной системы управления движением опорных тележек (рисунк 4.64).

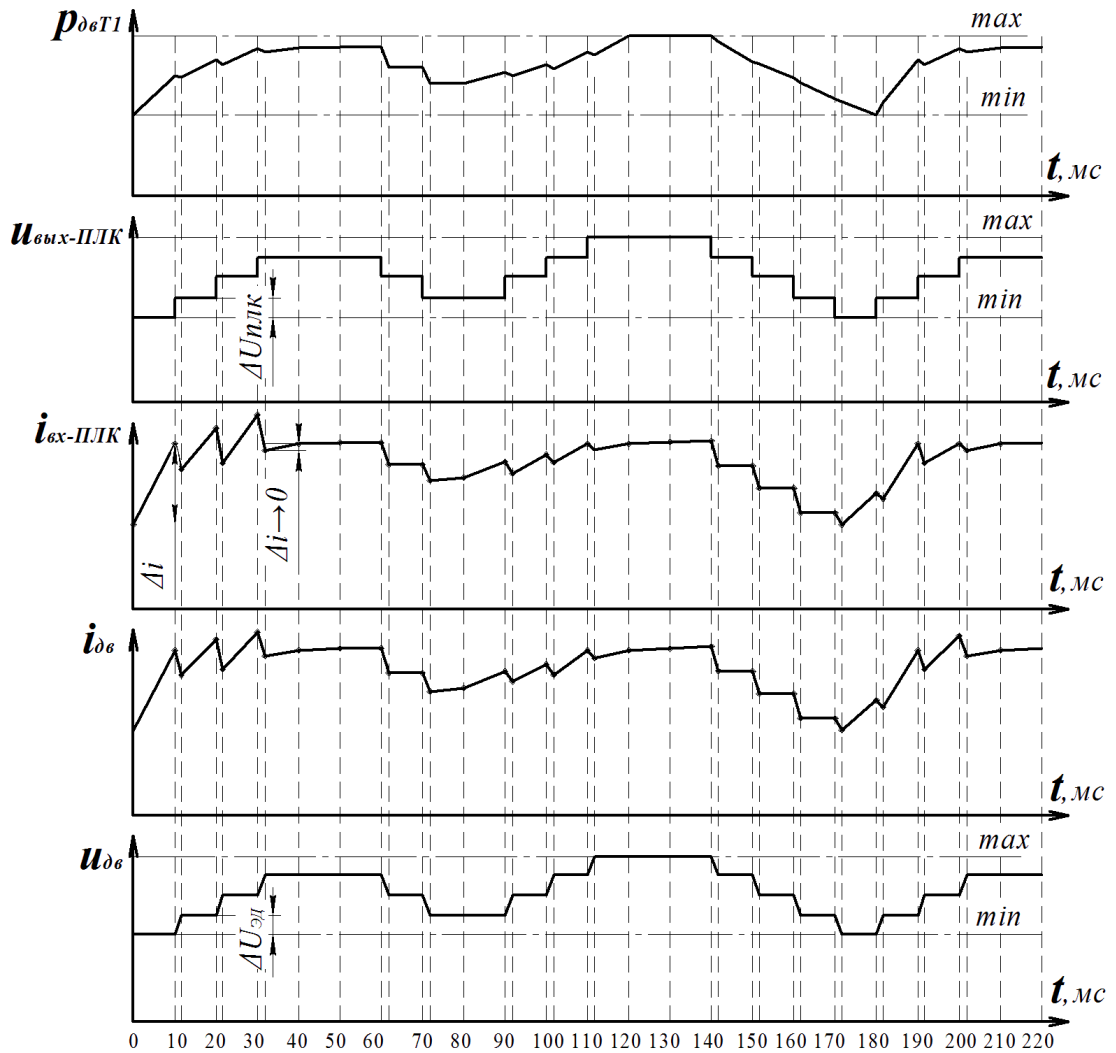


Рисунок 4.63 – Упрощенная временная диаграмма токов, напряжений и потребляемой мгновенной мощности электропривода: $p_{двГ1}$ – потребляемая мгновенная мощность; $u_{дв}$ – мгновенное напряжение на зажимах электродвигателя; $i_{дв}$ – мгновенный ток, протекающий по обмоткам электродвигателя; $u_{вых-ПЛК}$ – выходное напряжение ПЛК; $i_{вх-ПЛК}$ – входной ток ПЛК; Δi – изменение тока в интервалах времени; $\Delta U_{ПЛК}$ – степень переключения выходного аналогового напряжения ПЛК; $\Delta U_{эд}$ – степень переключения напряжения на зажимах электродвигателя

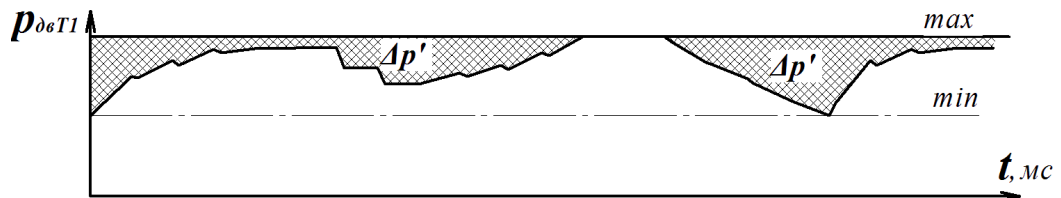


Рисунок 4.64 – Снижение потребляемой мгновенной мощности $\Delta p'$ электродвигателя с использованием адаптивной системы управления

Таким образом, адаптивная система автоматического управления позволяет снизить потребляемую мгновенную мощность на 5,3–36,2 %, энергопотребление водораспределения на 16,3 %, общее энергопотребление полива на 0,9 % и увеличить продолжительность использования аккумуляторного источника питания.

Разработка схемы логического управления движением дождеваль­ной машины, исключающей одновременный запуск электроприводов

Движение дождевальной машины выполняется дискретно по секциям. При включении электропривода опорной тележки крайней (последней) секции движение других опорных тележек подстраивается так, что при отклонении последующей опорной тележки секции от нормали на угол более чем φ при длине трубопровода секции l автоматически включается питание электропривода опорной тележки предыдущей секции (рисунок 4.65) [257, 258, 354].

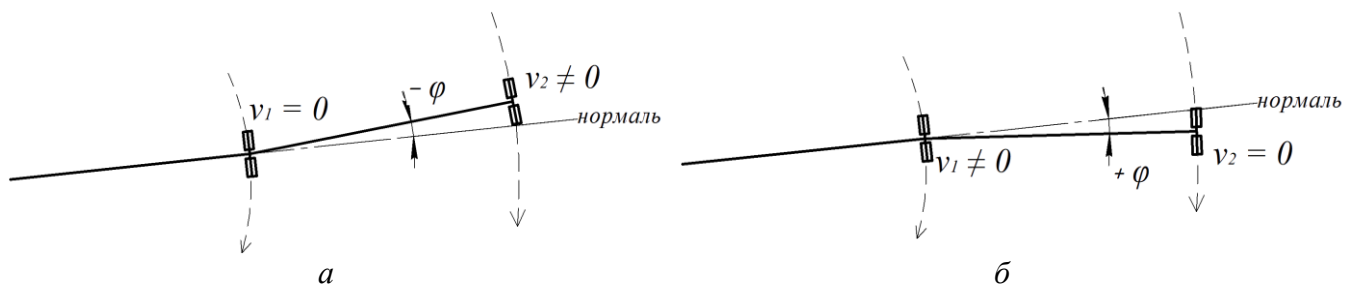


Рисунок 4.65 – Дискретное движение секций ДМ: *a* – перемещение последующей секции; *б* – перемещение предыдущей секции

Соблюдение движения в линию выполняет прибор ПСЛ (прибор синхронизации движения в линию), принцип работы которого состоит в контроле угла φ и включении/отключении питания электропривода. Такое дискретное управление приводит к случаям одновременного запуска нескольких электроприводов опорных тележек (3–5 и даже всех секций). Тогда картина нагрузочной характеристики источника в некотором промежутке времени имеет вид, представленный на рисунке 4.66.

Данный режим приводит к тому, что для автономных источников питания (таких, как переносной генератор) необходимо выполнение условия по выбору мощности:

$$P_{\text{Имакс}}(t_i) < P_{\text{Нмакс}}(t_i), \quad (4.177)$$

где $P_{\text{Имакс}}(t_i)$ и $P_{\text{Нмакс}}(t_i)$ – максимальная мощность соответственно источника электроэнергии и нагрузки в момент времени t_i , кВт.

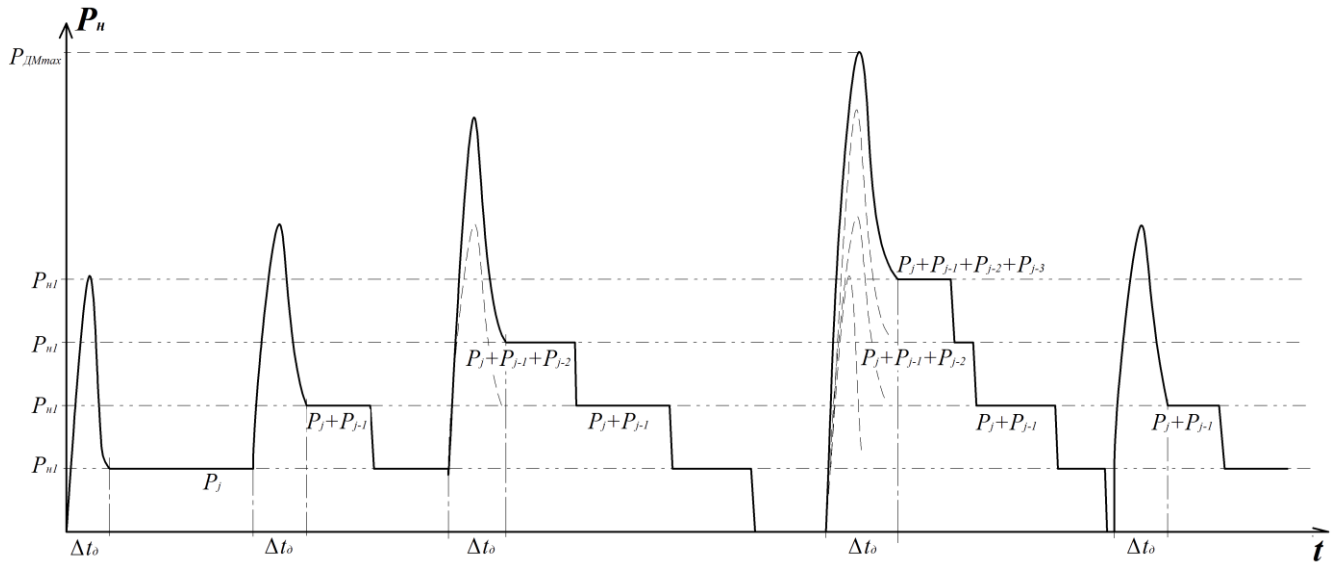


Рисунок 4.66 – Нагрузочная характеристика источника электрической энергии

Выполнение условия (4.177) приводит к тому, что при выборе источника энергии требуется закладывать большую мощность, чтобы удовлетворять нагрузке в каждый момент времени ее действия, т. е. с запасом. Вместе с этим сложение нагрузок секций приводит к совокупному показателю потерь энергии, чего можно избежать путем использования логической схемы поочередного включения электроприводов. Тогда общее количество энергии с логической схемой:

$$W_{\text{лог}} = W - W_{\text{СП}}, \quad (4.178)$$

где $W_{\text{СП}}$ – совокупные потери энергии при одновременном включении электроприводов, кВт·ч.

Использование логической схемы позволит снизить негативное влияние наложенных друг на друга пусков ЭД на источник, например, ДМ с переносным генератором, и исключить перерасход топлива при стабилизации работы двигателя внутреннего сгорания генератора [4, 8, 314, 70, 111, 146, 167, 175, 193, 273, 315, 341].

В схеме, представленной на рисунке 4.67, дополнительный контакт будет исключать одновременный пуск электродвигателей, что приведет к увеличению продолжительности выполнения полива, так как логическая остановка крайней тележки уже не будет контролироваться реле-задатчиком продолжительности включения ПВ.

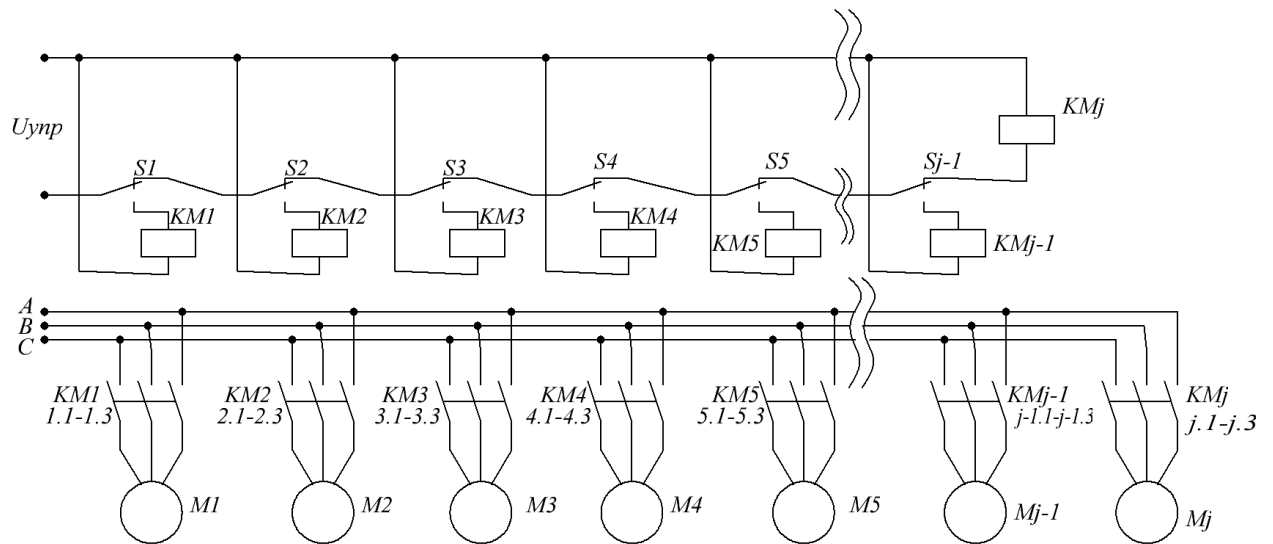


Рисунок 4.67 – Схема логического управления движением опорных тележек секций ДМ:
 $U_{упр}$ – напряжение цепи управления; $KM1$ – KMj – катушки цепи управления;
 $S1$ – Sj – переключатели; $KM1.1$ – 1.3 , ... $j.1$ – $j.3$ – главные контакты контакторов;
 $M1$ – Mj – электродвигатели

Временную диаграмму логической схемы построим на графике $U(t)$ (рисунок 4.68).

Минимальная продолжительность выполнения полива $T_{ДМmin}$ без схемы логического управления определяется по промежутку времени работы электропривода опорной тележки крайней j -й секции t_{pj} :

$$T_{ДМmin} = t_{pj}. \quad (4.179)$$

Со схемой логического управления (см. рисунок 4.67) продолжительность работы ДМ будет ориентирована на продолжительность работы каждого электропривода в отдельности (см. рисунок 4.68):

$$T_{ДМmin}^{лог} = t_j + t_{j-1} + \dots + t_1 = \frac{j(t_j + t_1)}{2}. \quad (4.180)$$

Если скорость перемещения опорных тележек одинакова, то продолжительность оборота крайней секции относительно первой секции:

$$t_{pj} = jt_1. \quad (4.181)$$

Тогда доля увеличения продолжительности работы ДМ со схемой логического управления, с количеством секций j :

$$\tau' = \frac{T_{ДМmin}^{лог}}{T_{ДМmin}} = \frac{j(jt_1 + t_1)}{2jt_1} = \frac{j+1}{2}. \quad (4.182)$$

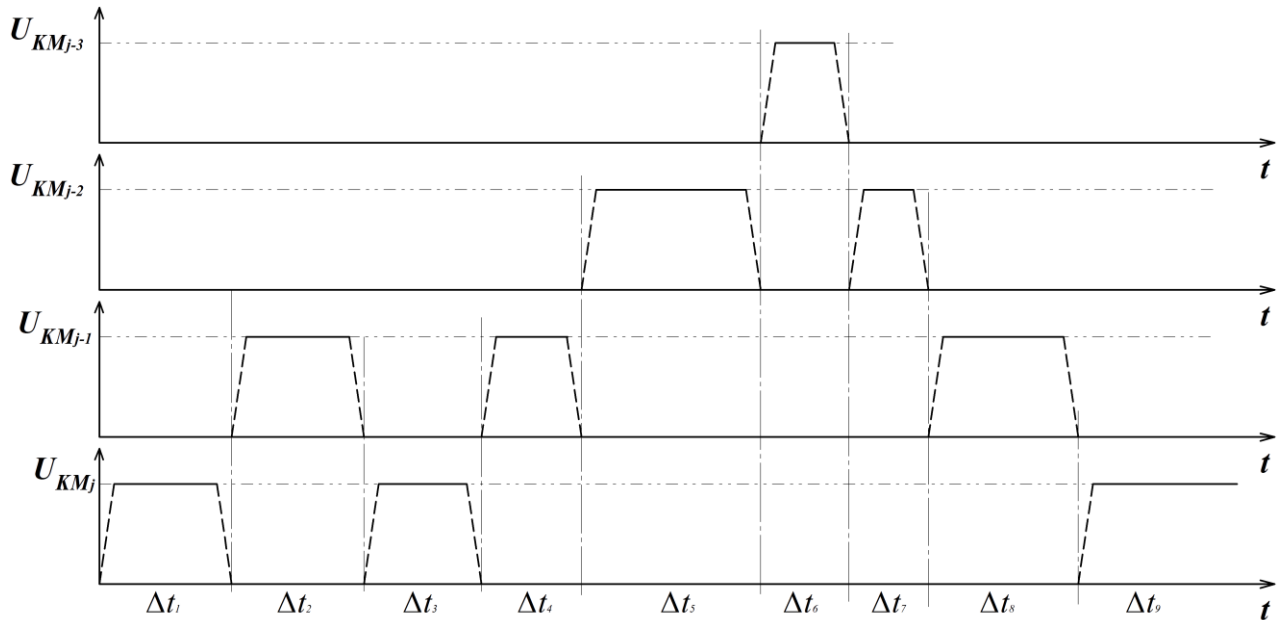


Рисунок 4.68 – Временная диаграмма логической части схемы управления движением секций ДМ

Из выражения (4.182) для ДМ, состоящей из 10 секций, продолжительность работы со схемой логического управления увеличится в 5,5 раза. Такое положение требует регулирования поливной нормы, так как при большем простое отдельные участки будут в большей степени залиты водой.

Номинальная мощность источника питания (переносного генератора) оценивается суммой мощностей каждого потребителя и коэффициентом одновременности k_o , который определяется по вероятности одновременного запуска электроприводов:

$$P_{\text{Имакс}}(t) > k_o(B_1(t)) \sum_{i=1}^j P_i, \quad (4.183)$$

где $B_1(t)$ – вероятность одновременного включения всех секции; P_i – электрическая нагрузка i -й секции (мощность электродвигателя и устройств автоматики опорной тележки i -й секции), начиная с крайней, кВт; j – количество секций дождевальная машины.

Вероятность одновременного включения в работу всех электроприводов можно определить по длине трубопровода секции и длине окружности пути, пройденного каждой тележкой. Изобразим длину пройденного пути каждой опорной тележкой в виде прямой линии (рисунок 4.69).

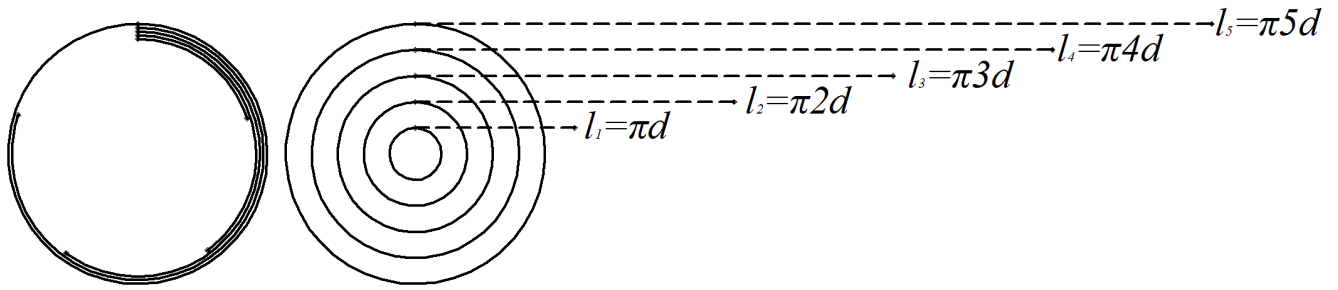


Рисунок 4.69 – Сравнение длины пройденного пути опорных тележек ДМ

Согласно геометрическим параметрам движения [18] и теории математической статистики [238], вероятность одновременного запуска электродвигателей опорных тележек можно определить по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} B_j(t)P_j &= 1, \\ B_{j-1}(t)(P_{j-1}; P_j) &= \frac{j-1}{j}, \\ B_1(t)(\sum_{n=1}^j P_j) &= \frac{1}{j}. \end{aligned} \right\} \quad (4.184)$$

С учетом вероятности события – движение ДМ в виде прямой линии (нормали) и скоростных характеристик опорных тележек, вероятность одновременной работы всех электроприводов легко определить. Результаты расчета вероятности сведем в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета вероятности одновременного запуска электроприводов при количестве секций $j = 10$

| Количество электроприводов, запущенных одновременно | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $B_i(t)$ | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |

На основе данных таблицы 4.4, с вероятностью 0,1 существует возможность запуска всех электроприводов одновременно. Поэтому при выборе источника питания (например, переносного генератора) необходимо это учитывать.

Применение схемы логического управления, исключающей одновременную работу электроприводов, позволит получить:

$$P_{\text{и}}^{\text{лог}} = P_j. \quad (4.185)$$

На основе этих данных определим возможный диапазон снижения энергопотребления для переносного генератора со схемой логического управления.

Примем, что переносной генератор без схемы логического управления имеет мощность $P_{иг}$ и при продолжительности включения ПВ = 100 % обеспечивает энергией дождевальную машину за один полив в течение промежутка времени t_{pj} :

$$W_{\Gamma} = P_{иг} t_{pj}. \quad (4.186)$$

Для ДМ со схемой логического управления движением необходим генератор, мощность которого:

$$P_{иг}^{лог} = \frac{P_{иг}}{j}, \quad (4.187)$$

где j – количество опорных тележек (секций).

Тогда потребление энергии ДМ со схемой логического управления:

$$W_{\Gamma}^{лог} = \frac{P_{иг}}{j} \frac{j t_{pj} (j+1)}{2} = \frac{P_{иг} t_{pj} (j+1)}{2}. \quad (4.188)$$

С учетом (4.182) доля снижения энергопотребления водораспределения при использовании схемы логического управления (рисунок 4.70):

$$\Delta W_{лог} = \frac{W_{\Gamma} - W_{\Gamma}^{лог}}{W_{\Gamma}} = 1 - \frac{P_{иг} t_{pj} (j+1)}{2 j P_{иг} t_{pj}} = 1 - \frac{j+1}{2j}. \quad (4.189)$$

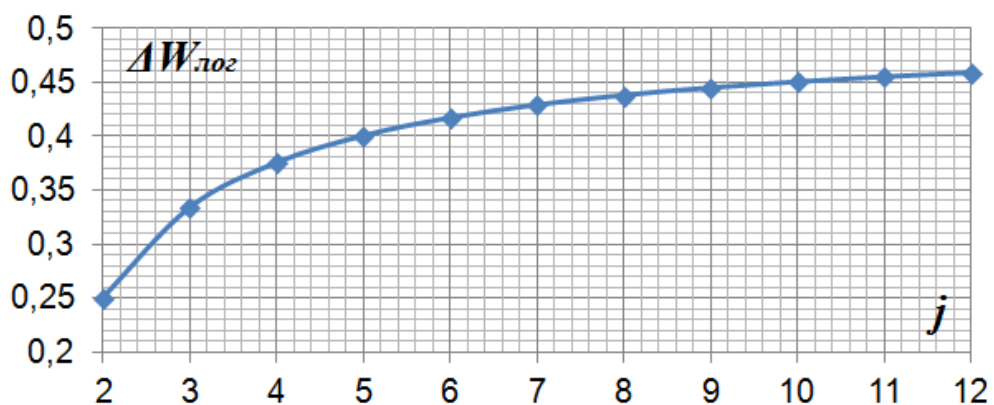
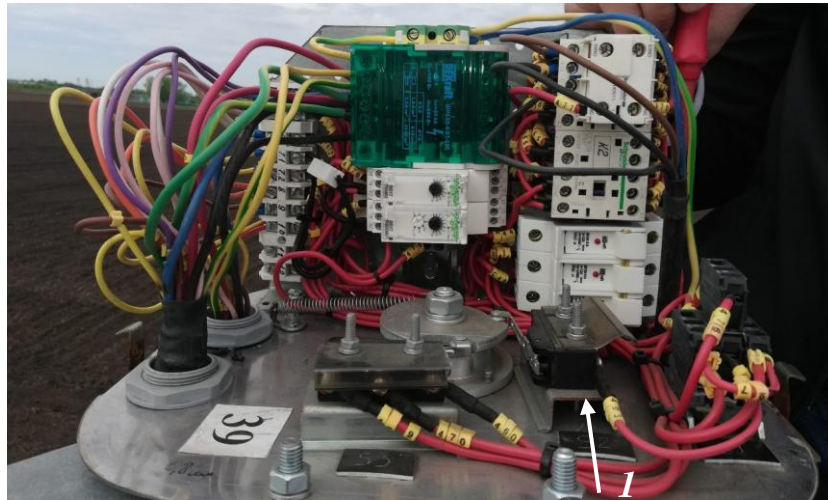


Рисунок 4.70 – Зависимость снижения энергозатрат от числа опорных тележек (секций) ДМ с использованием логической схемы управления

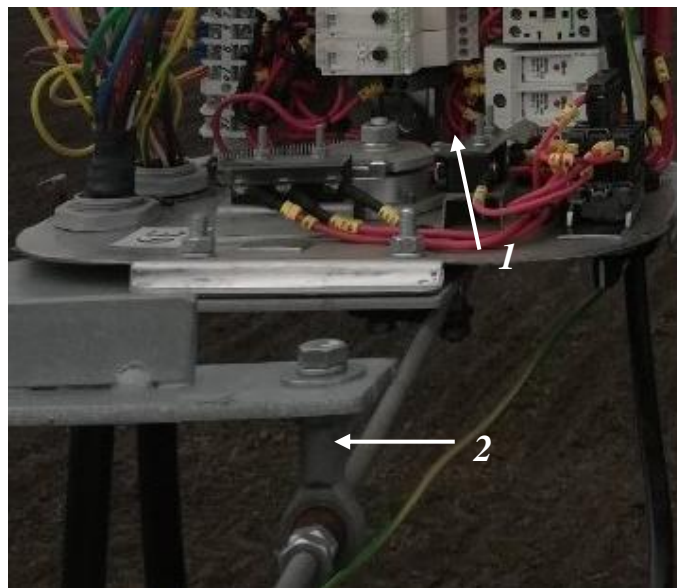
Таким образом, использование схемы логического управления для источника в виде переносного генератора приводит к снижению энергопотребления водораспределения на 25,2–48,8 %, а энергопотребление полива на 1,0–3,4 %.

4.5.3 Разработка устройства пространственного положения секции дождевальнoй машины

Прибор синхронизации движения в линию как электромеханическое устройство управления имеет чувствительный элемент в виде рычага, который, отклоняясь на определенный угол φ , механически воздействует на концевой выключатель катушки магнитного пускателя электродвигателя (рисунок 4.71) [42].



a



б

Рисунок 4.71 – Общий вид прибора синхронизации движения в линию: *a* – положение концевoго выключателя; *б* – подсоединение чувствительного элемента; 1 – концевoй выключатель; 2 – рычаг (чувствительный элемент)

Сложность настройки работы ПСЛ заключается в регулировании диапазона хода рычага, который имеет расстояние 1...5 мм из-за соотношения длины водопроводящего трубопровода последующей секции к длине рычага с соблюдением

угла отклонения от нормали $\varphi = 2,0^\circ \dots 2,5^\circ$. Энергопотребление ПСЛ определяется через сопротивление контакта концевого выключателя:

$$W_{\text{ПСЛ}} = U_1 I t = I^2 R_{\text{кв}} t, \quad (4.190)$$

где $R_{\text{кв}}$ – сопротивление концевого выключателя, Ом; t – продолжительность замкнутого состояния контакта концевого выключателя, с.

Если рассмотреть устройство, которое выполняет такую же функцию, но на более низком энергетическом уровне, например, при более низком напряжении:

$$U_2 < U_1, \quad (4.191)$$

где U_2 – рабочее напряжение усовершенствованного устройства при таком же сопротивлении R_2 :

$$R_2 = R_{\text{кв}}. \quad (4.192)$$

Рассмотрим устройство определения угла поворота на примере ультразвукового приемопередатчика (рисунок 4.72).

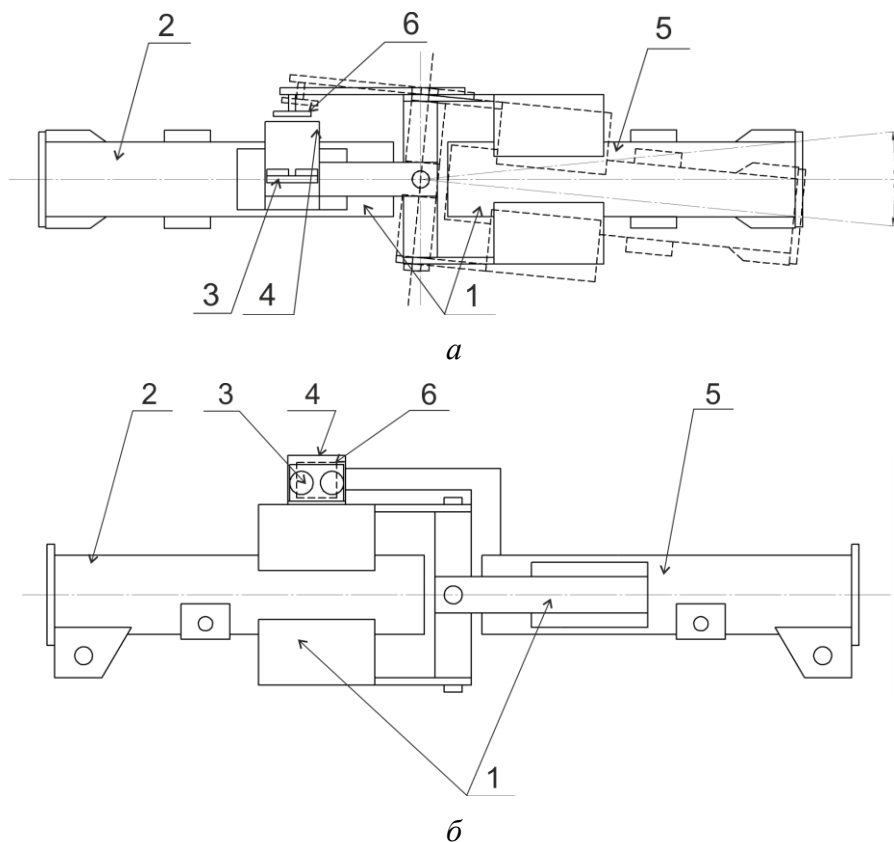


Рисунок 4.72 – Схема устройства определения угла поворота секции ДМ:
a – вид сверху; *б* – вид сбоку; 1 – шарнир; 2 – неподвижная часть шарнира;
 3 – приемопередатчик; 4 – изолирующий экран; 5 – подвижная часть шарнира;
 6 – отражатель

В ходе движения двух соседних секций трубопровод искривляется в вертикальной плоскости из-за того, что пути перемещения опорных тележек секций различны. Возникший между секциями угол контролируется для того, чтобы избежать сбоя в траектории движения и излома трубопровода.

Когда возникает угол, превышающий допустимый ($\varphi = 2,0^\circ \dots 2,5^\circ$), то изменяется расстояние между приемопередатчиком 3 (см. рисунок 4.72), закрепленным на неподвижной части 2 шарнира 1, и отражателем 6, закрепленным на подвижной части 5 шарнира 1. Ультразвуковые лучи, испускаемые от приемопередатчика 3, отражаются от отражателя 6 и возвращаются обратно в приемопередатчик. Путь, пройденный лучами, рассчитывается и соотносится с углом между секциями. При возникновении критического значения угла движение последующей секции, прикрепленной к подвижной части 5 шарнира 1, прекращается. Для снижения погрешности измерения пути, пройденного лучами, использован изолирующий экран 4.

На данное устройство получен патент РФ на изобретение [216].

Расстояние между приемопередатчиком можно регулировать путем перемещения рычага отражателя и приемопередатчика вдоль трубопровода предыдущей секции.

Доля снижения энергопотребления от применения устройства определения угла поворота секции на ультразвуковом передатчике:

$$\Delta W_{\text{во}} = \frac{W_{\text{ПСЛ}} - W_{\text{уз}}}{W_{\text{ПСЛ}}} = 1 - \frac{U_2^2 t_{\text{пу}} R_1}{R_2 U_1^2 t_{\text{пп}}}, \quad (4.193)$$

где U_1 и U_2 – номинальные напряжения соответственно устройства ПСЛ и ультразвукового устройства, В; R_1 и R_2 – эквивалентные сопротивления соответственно ПСЛ и ультразвукового устройства, Ом; $t_{\text{пп}}$ и $t_{\text{пу}}$ – продолжительность работы соответственно ПСЛ и ультразвукового устройства, ч.

Примем допущение, что эквивалентные сопротивления сравниваемых устройств равны, т. е. $R_1 = R_2$. Продолжительность работы ультразвукового приемо-передатчика совпадает с продолжительностью работы всей машины, так как данное устройство должно находиться в режиме ожидания пока выполняется движение дождевальная машины. Тогда продолжительность работы ультразвукового устройства одной секции:

$$t_{\text{пу}} = \frac{j(jt_{\text{пл}} + t_{\text{пл}})}{2}. \quad (4.194)$$

Для всех устройств управления дождевальными машинами, состоящей из j секций:

$$\sum t_{py} = (j-1) \frac{j(jt_{p1} + t_{p1})}{2}. \quad (4.195)$$

Продолжительность работы ПСЛ зависит от продолжительности работы электропривода. Для опорной тележки первой секции продолжительность работы ПСЛ t_{p1} , для следующей – $2t_{p1}$ и т. д.

Определим продолжительность работы всех ПСЛ и ультразвуковых устройств для дождевальной машины, состоящей из j секций:

$$\sum t_{пп} = \frac{j(jt_{p1} + t_{p1})}{2}. \quad (4.196)$$

Подставляя (4.194) и (4.196) в выражение (4.193), получим:

$$\Delta W_{yo} = 1 - \frac{(j-1)U_2^2}{U_1^2}. \quad (4.197)$$

Полученное выражение (4.197) отражает смысл применения нового устройства. Ультразвуковой приемопередатчик должен находиться в постоянном режиме ожидания, что увеличивает продолжительность его работы и, соответственно, энергопотребление. Однако данные устройства просты в обслуживании, так как при программировании одного диапазона работы приемопередатчика не требуется его регулярная настройка. Кроме того, ультразвуковой приемопередатчик не ограничен ресурсом срабатываний, что в целом повышает надежность работы устройства управления. Как правило, ультразвуковые приемопередатчики выпускают на низкое напряжение питания.

Рассмотрим зависимость потребляемой энергии сравниваемых устройств (рисунок 4.73) и долю снижения энергопотребления при использовании новых устройств управления с различным напряжением питания (рисунок 4.74).

На рисунке 4.73 показана зависимость потребляемой энергии на управление секций ДМ. Например, для машины, состоящей из 10 секций, потребляемая энергия на управление приборами ПСЛ составит 239 Вт·ч. Такая же дождевальная машина с устройствами управления на ультразвуковых приемопередатчиках будет потреблять от 5 до 102 Вт·ч энергии (в зависимости от напряжения питания 5 В, 12, 24 В), что в 2,3–47,8 раза меньше энергии, потребляемой ПСЛ.

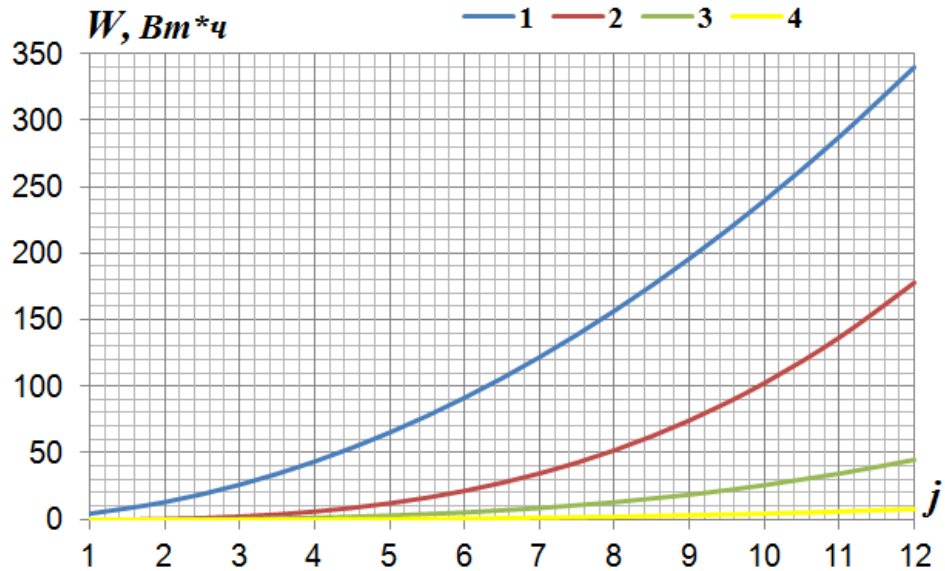


Рисунок 4.73 – Зависимость потребляемой энергии устройствами управления перемещением секций: 1 – прибор ПСЛ с напряжением питания 110 В; 2 – устройство определения угла поворота на ультразвуковом приемопередатчике с напряжением питания 24 В; 3 – то же с напряжением питания 12 В; 4 – то же с напряжением питания 5 В

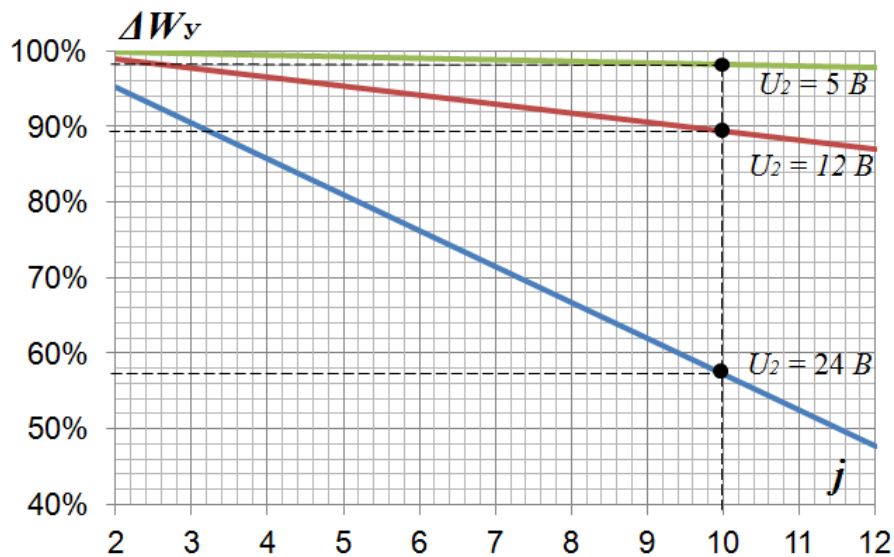


Рисунок 4.74 – Доля снижения энергопотребления при сравнении устройств управления на ультразвуковых приемопередатчиках, работающих на номинальном напряжении 5 В, 12, 24 В с электромеханическим прибором ПСЛ, работающим на номинальном напряжении 110 В

На основе полученных теоретических данных разработан образец устройства определения угла поворота, а также собран стенд в лабораторных условиях для проверки работоспособности устройства на ультразвуковом приемопередатчике (рисунки 4.75 и 4.76).

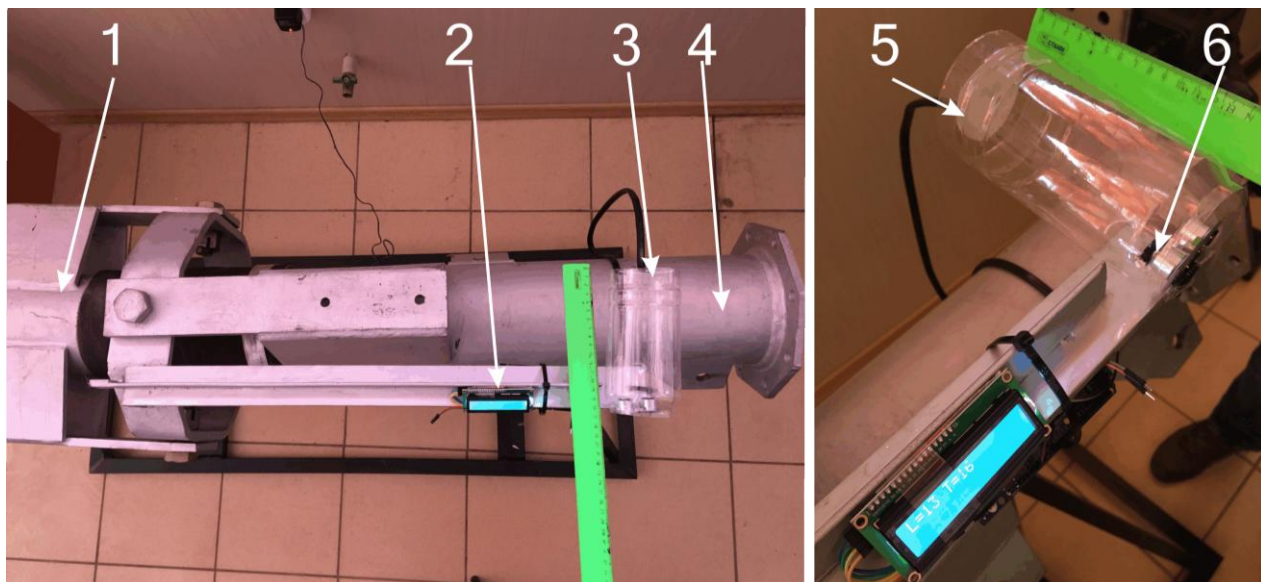


Рисунок 4.75 – Испытание устройства определения угла поворота на ультразвуковом приемопередатчике при угле 10° : 1 – подвижная часть шарнира; 2 – дисплей контроля расстояния; 3 – экран; 4 – неподвижная часть шарнира; 5 – отражатель; 6 – ультразвуковой приемопередатчик HC SR-04 (Arduino)

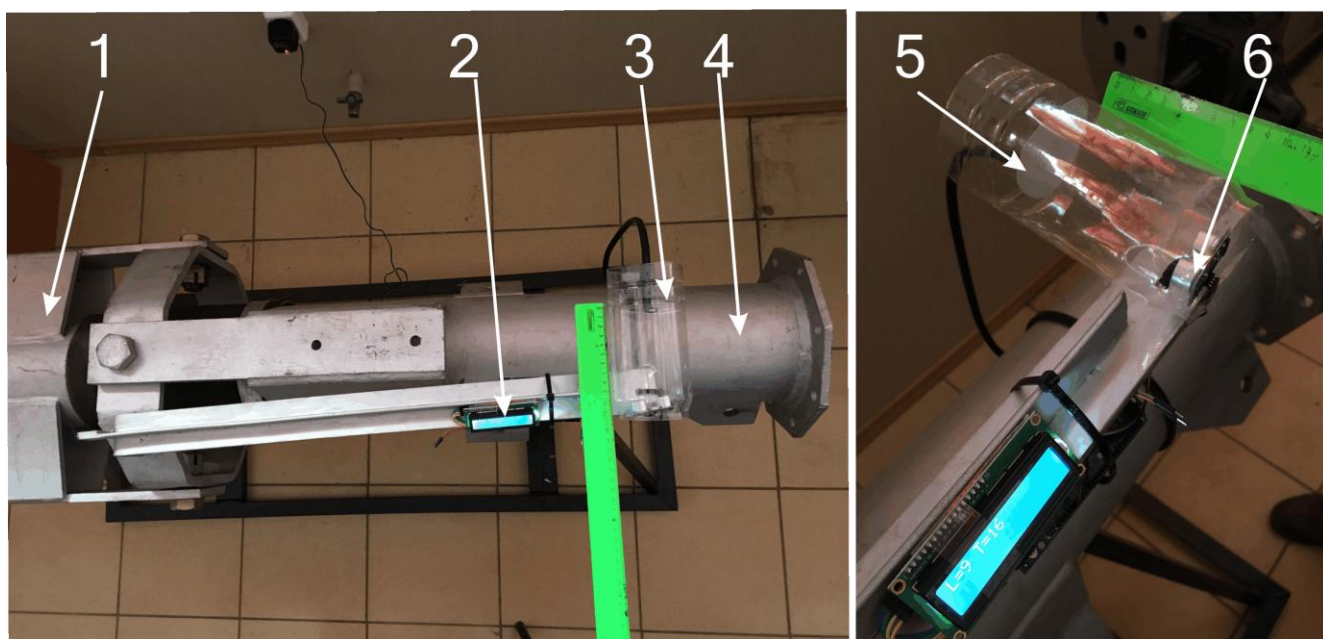


Рисунок 4.76 – Испытание устройства определения угла поворота на ультразвуковом приемопередатчике при угле 5° : 1 – подвижная часть шарнира; 2 – дисплей контроля расстояния; 3 – экран; 4 – неподвижная часть шарнира; 5 – отражатель; 6 – ультразвуковой приемопередатчик HC SR-04 (Arduino)

Таким образом, использование разработанного устройства определения угла поворота позволяет снизить энергопотребление на управление в 2,34–47,8 раза, что в структуре общего энергопотребления составит 0,18–0,48 %. Вместе с этим сократится продолжительность наладки системы управления по сравнению с ПСЛ.

4.6 Выводы по главе

1. Обоснована зависимость потребляемой мощности электродвигателя опорной тележки секции ДМ от параметров грунта, движителей, передачи и рабочей массы и установлено, что электродвигатель при тяжелых условиях эксплуатации загружен на 50–80 %.

2. При изменении конструктивных параметров (диаметра водораспределительного трубопровода и параметров колес опорной тележки) и выполнении мелиоративных требований полива снижается нагрузка на электропривод опорной тележки на 14–47 %, что в совокупности с насосом водоподачи позволяет снизить потребление энергии на 0,37–1,91 %.

3. Обоснована зависимость продолжительности работы дождевальной машины, оснащенной двигателями постоянного тока, от параметров аккумуляторного источника питания с возобновляемыми источниками энергии и установлено, что при режиме работы ДМ ПВ = 10 % для восполнения заряда АКБ требуется 1 день, а при ПВ = 100 % – 5–7 дней с вероятностью 0,9.

3. Применение бустерного насоса для большего охвата поливной площади полива с точки зрения энергопотребления оправдывается при использовании консольного трубопровода длиной $l_{\text{конс}} > 0,5l$.

4. Разработанные технические средства – устройство динамической компенсации реактивной мощности, схемы управления движением секций ДМ, а также устройство определения угла поворота секции – позволяют снизить энергопотребление полива дождевальными машинами кругового действия на 1,2–3,9 %.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И УСТРОЙСТВА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

5.1 Экспериментальные исследования аккумуляторного источника питания дождевальных машин кругового действия

Теоретические положения требуют экспериментального подтверждения. Это позволяет более полно охарактеризовать полученные зависимости и учесть влияние различных факторов на практике.

Ключевым теоретическим положением является использование аккумуляторных батарей в качестве основного источника питания дождевальной машины при обеспечении требуемой продолжительности работы электропривода. Проверка аккумуляторного способа питания заключается в разработке различных схем подключения АКБ и снятии всех необходимых характеристик при лабораторных, стендовых и полевых испытаниях. Основным выходным показателем физического эксперимента является установление зависимости между продолжительностью работы электропривода и параметрами аккумуляторной батареи. Исходя из результатов экспериментальных исследований, можно сформулировать практические рекомендации применения аккумуляторного способа питания.

На продолжительность работы электропривода влияет ряд факторов: напряжение на выводах батареи, т. е. ЭДС, $E_{\text{АКБ}}$ (В), которое подбирают путем $n_{\text{акб}}$ последовательно соединенных тяговых аккумуляторных батарей; номинальная емкость батареи C_N (А·ч), которую подбирают путем $m_{\text{акб}}$ параллельно соединенных ТАБ; параметры аккумуляторов – E_1 и C_{M1} ; коэффициент максимального разряда k_q и коэффициенты временного использования тока k_t и емкости k_{qt} ; мощность электродвигателя опорной тележки $P_{\text{двТ1}}$, а также число его пусков w . Для определения основного параметра t_p , необходимо зафиксировать влияние этих факторов:

$$t_p = f(E_{\text{АКБ}}; C_N; P_{\text{двТ1}}; k_q; k_t; k_{qt}; w). \quad (5.1)$$

Связь этих параметров установлена теоретически и выражена уравнением (4.118).

На основе совокупности факторов выражения (5.1) необходимо разработать несколько схем включения аккумуляторов для варьирования этих факторов в соответствии с данными, установленных заводами-изготовителями [337, 338]. При разработке различных схем необходимо учитывать параметры аккумуляторной батареи (тип, марка, технические и внешние характеристики).

Измерение параметров следует выполнять согласно [247, 312] с учетом погрешности приборов измерений тока I_i , напряжения U_i , продолжительности t_{pi} , емкости C_{Ni} и в соответствии с методиками выполнения измерений приборами, используемыми в эксперименте.

Измерения в различных опытах обязательно проводить в одинаковых условиях окружающей среды, поскольку аккумуляторные батареи чувствительны к температуре, влажности, запыленности, как любой электрический источник питания.

Обработку результатов эксперимента выполнить с использованием теории регрессионного анализа. Для этого необходимо определить количество опытов снятия характеристик, используя теорию математического планирования эксперимента [51, 131, 196, 202].

На продолжительность работы электропривода опорной тележки секции ДМ будут влиять изменяющаяся нагрузка на электропривод. Примем условие эксперимента, что потребляемая мощность электродвигателя при изменяющейся нагрузке электропривода остается постоянной – $P_{двТ1} = \text{const}$ (загрузка электропривода определяется коэффициентом загрузки $\beta_3 = 80 \%$ [118]). Тогда в соответствии с выражением (5.1) остальные факторы будут иметь пределы варьирования, которые определяют по данными заводов-изготовителей (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Факторы, влияющие на продолжительность работы секции ДМ

| Обозначение | Фактор | Коды и значения их пределов варьирования | | |
|-------------|---|--|-------|------|
| | | –1 | 0 | +1 |
| x_1 | ЭДС батареи E , В | 36 | 48 | 60 |
| x_2 | Емкость батареи C_N , А·ч | 65 | 97,5 | 130 |
| x_3 | Коэффициент максимального разряда k_q | 0,05 | 0,175 | 0,3 |
| x_4 | Коэффициент временного использования тока k_t | 0,01 | 0,02 | 0,03 |
| x_5 | Количество пусков w | 10 | 55 | 100 |

Тогда в соответствии с теорией планирования эксперимента [51, 131, 196, 202] на двух уровнях варьирования принимаем количество опытов:

$$N = 2^n, \quad (5.2)$$

где n – количество действующих факторов.

Получаем количество опытов $2^5 = 32$.

Разработка стенда для исследования аккумуляторного источника питания электропривода

На основе полученного количества опытов необходимо разработать принципиальные электрические схемы лабораторных установок. Для этого нужно учитывать варьирование факторов. Для варьирования ЭДС и емкости достаточно обеспечить установку требуемым количеством аккумуляторов. Для варьирования коэффициентов k_i , k_q необходимо подобрать разные типы аккумуляторов. А для варьирования числа пусковых циклов потребуется разработать схему с постом управления включения и отключения питания электропривода.

С учетом рассматриваемых факторов выходным параметром будет продолжительность работы, измерение которой при различных схемах потребует длительных испытаний, так как при одних и тех же условиях проверки ТАБ нужно будет между опытами их заряжать до емкости 100 %. Таким образом, продолжительность каждого опыта будет складываться из промежутков времени работы ТАБ (разряд до минимально возможного уровня емкости в соответствии с паспортными данными аккумуляторов) и промежутка времени восстановления емкости ТАБ (заряд до уровня емкости 100 %).

Рассмотрим электрическую схему цепи (рисунок 5.1). В ней использованы тяговые аккумуляторные батареи Bat с ЭДС 12 В и эквивалентным внутренним сопротивлением батареи r_1 . В качестве эквивалентного сопротивления R_2 представлены устройства управления и защиты, эквивалентного сопротивления R_1 – проводники. Имеются также электропривод M_1 и ключ S_1 .

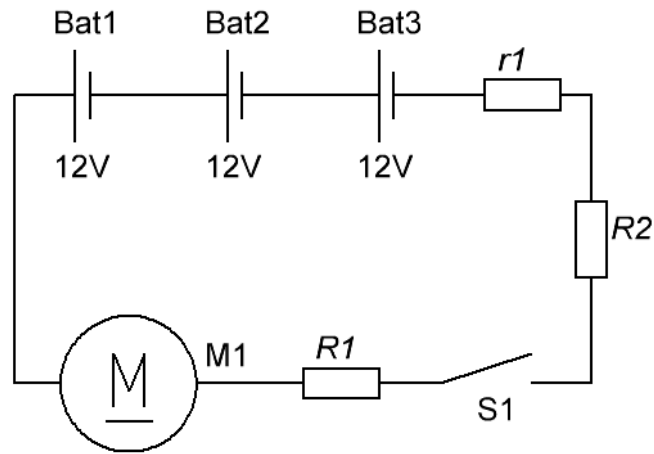


Рисунок 5.1 – Электрическая цепь опытов с ЭДС источника 36 В и емкостью 65 А·ч

На основе рисунка 5.1. была собрана электрическая принципиальная схема лабораторного стенда с измерительными приборами (рисунок 5.2).

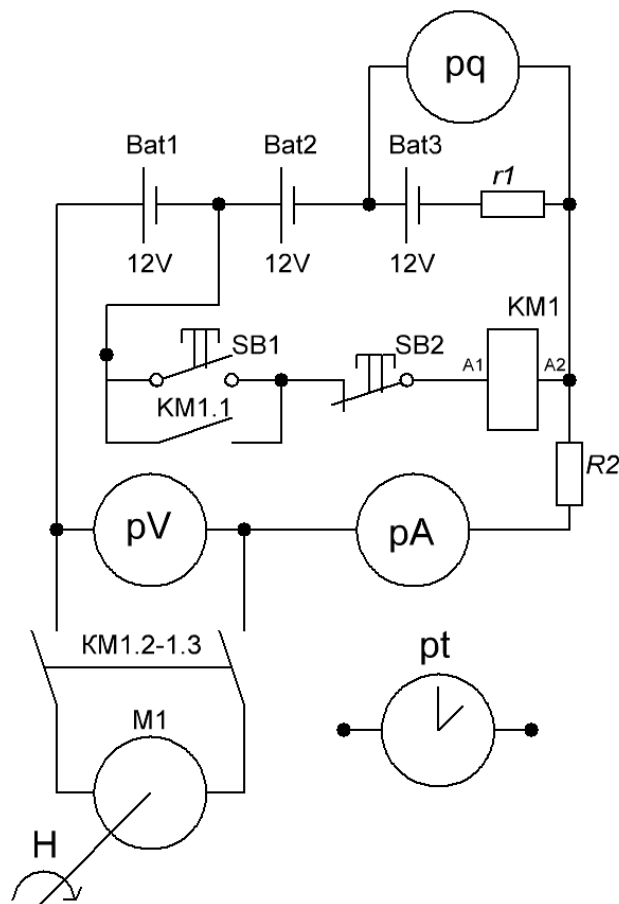


Рисунок 5.2 – Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки с измерительными приборами для исследования характеристик источника питания в виде аккумуляторных батарей: pt – электронный автономный секундомер; pA – амперметр постоянного тока; pV – вольтметр постоянного тока; pq – измеритель емкости заряда батареи; H – нагрузка на валу электропривода; KM1, KM1.1–1.3 – магнитные пускатели; SB1, SB2 – кнопки пуск-стоп

На основе электрической цепи (см. рисунок 5.1) путем последовательного или параллельного присоединения аккумуляторов варьируют факторы напряжения питания и емкости батареи. При этом для эксперимента потребуется использование аккумуляторов двух видов с различными разрядными характеристиками для изменения коэффициентов: 1 – с коэффициентами $k_q = 0,05$ и $k_t = 0,01$; 2 – с коэффициентами $k_q = 0,3$ и $k_t = 0,01$; 3 – с коэффициентами $k_q = 0,05$ и $k_t = 0,03$; 4 – с коэффициентами $k_q = 0,3$ и $k_t = 0,03$.

Общий вид стенда изображен на рисунке 5.3.

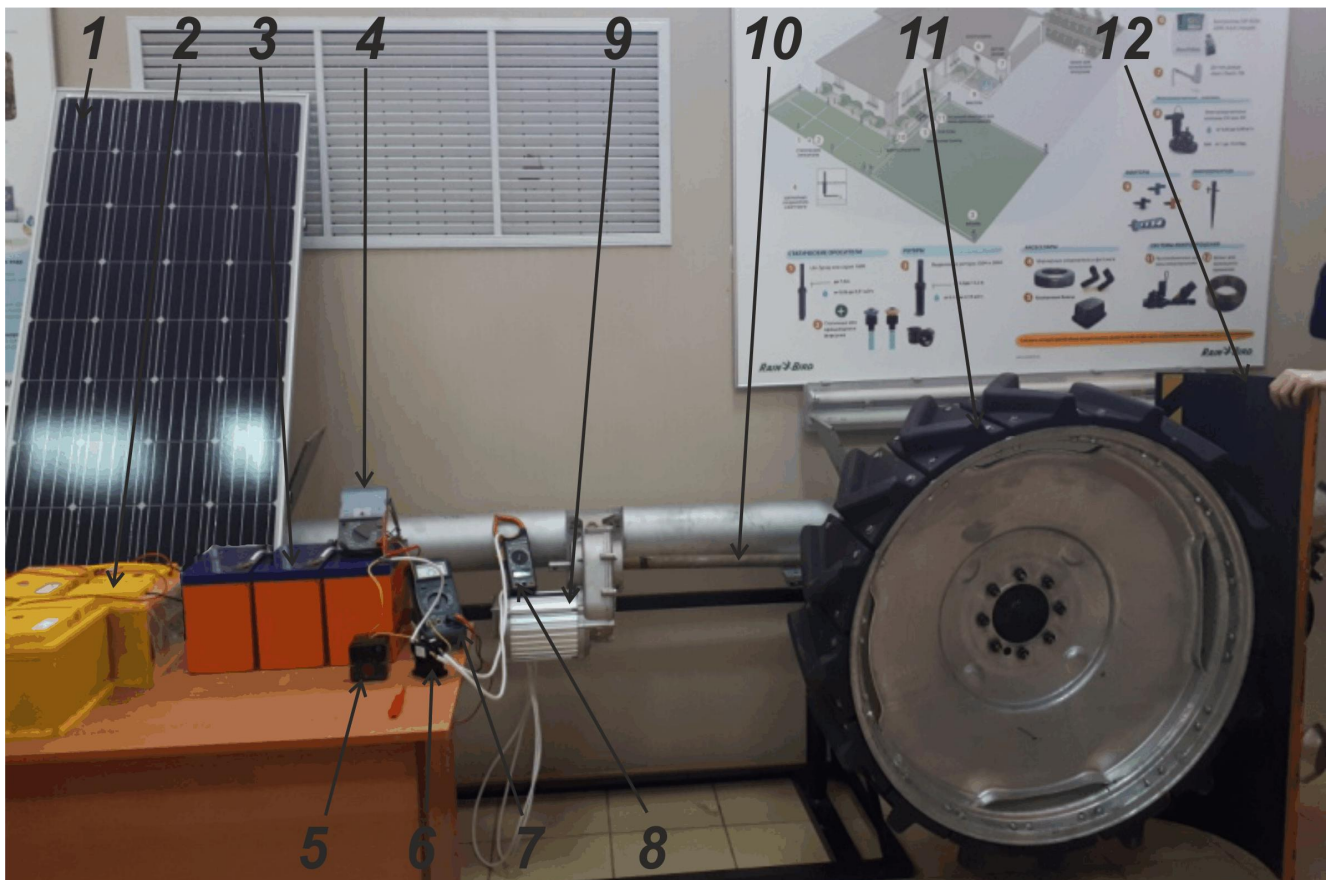


Рисунок 5.3 – Общий вид лабораторного стенда для испытаний источника питания в виде аккумуляторных батарей: 1 – солнечная панель (не подключена); 2 – аккумуляторы Discover EV 34A-A; 3 – аккумуляторы Delta GEL 12-65; 4 – измеритель емкости заряда АКБ; 5 – кнопки пуск/стоп; 6 – контактор с катушкой 24 В (DC); 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – электродвигатель (мотор-редуктор); 10 – вал передачи момента вращения; 11 – движитель (жесткое колесо типа Rainefine Plastic tire); 12 – нагрузка на колесо

Для снятия характеристик использовали устройства и приборы, приведенные в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Основные характеристики устройств лабораторного стенда

| Наименование оборудования | Марка (маркировка) | Основные характеристики |
|--|--|--|
| Вентильный электродвигатель на постоянных магнитах | Мотор-редуктор WHY-CHOOSE YAYU BM1418HQF-L | Номинальная мощность 500 Вт Номинальное напряжение 36/48/60 DCV Номинальный ток 18/14/11 А |
| Контактор | Контактор ПМЛ-2165ДМ-32А-24DC-УХЛ4-Б-КЭАЗ | Номинальный ток 32 А Номинальное напряжение катушки 24 DCV |
| Кнопки старт/стоп | Кнопка двойная TDM MPD2-11Y | Номинальное напряжение 220 В Номинальный ток 2,5 А |
| Аккумуляторная батарея | Delta GEL 12-65 | Номинальное напряжение 12 В Номинальная емкость 65 А·ч |
| | Discover EV 34А-А | Номинальное напряжение 12 В Номинальная емкость 65 А·ч |
| Вольтметр | АКИП Multimetr GDM 354А | Предел измерения напряжения DC 20–200 В (2,5 %) |
| Амперметр | PEAK HOLD 260D CLAMP METER | Предел измерения тока DC 0,2–20 А (2,5 %) |
| Измеритель емкости заряда АКБ | SCAT-T-AUTO | Напряжение 9–14 В Емкость 0,1–120 А·ч |
| Секундомер | «Интеграл С-01» | Диапазон измерений от 0 с до 99 ч 59 мин 59,99 с |
| Соединительный кабель | ПВС 2×6 | – |

Все измерения проводили в соответствии с инструкциями по применению приборов и согласно [247, 281, 312].

Анализ и обработка экспериментальных данных

Выполним обработку данных, полученных в ходе эксперимента по определению продолжительности работы электропривода при различных параметрах аккумуляторного способа питания.

Составим уравнение регрессии и проанализируем его в соответствии с данными теории математического планирования эксперимента [51, 84, 99, 107, 127, 131, 196, 202]. Определим минимальные $x_{i-\min}$, максимальные $x_{i-\max}$, средние значения x_{0i} и интервал варьирования Δx_{0i} факторов и обозначим их символами согласно [107]. Значения принимаем по расчетным данным на основе типоразмера исполнительного оборудования – параметров электродвигателя постоянного тока, выпускаемого промышленностью (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Основные характеристики плана 5-факторного эксперимента

| № п/п | Фактор | | Варьирование | | | |
|----------|---|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| | наименование | обозначение | нижний уровень | средний уровень | верхний уровень | интервал варьиров. |
| 1 | ЭДС аккумуляторной батареи, В | $E_{АКБ}$ | 36 | 48 | 60 | 12 |
| | | \tilde{x}_1 | -1 | 0 | +1 | - |
| 2 | Емкость заряда аккумуля- торной батареи, А·ч | C_N | 65 | 97,5 | 130 | 32,5 |
| | | \tilde{x}_2 | -1 | 0 | +1 | - |
| 3 | Коэффициент макси- мального разряда | k_q | 0,05 | 0,175 | 0,3 | 0,125 |
| | | \tilde{x}_3 | -1 | 0 | +1 | - |
| 4 | Коэффициент времен- ного использования тока | k_t | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| | | \tilde{x}_4 | -1 | 0 | +1 | - |
| 5 | Количество пусков | w | 10 | 55 | 100 | 45 |
| | | \tilde{x}_5 | -1 | 0 | +1 | - |

На первом этапе регрессионного анализа данных представим функцию $t_p = f(E; C; k_i; k_c; w)$ в виде линейного полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5, \quad (5.3)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ – коэффициенты линейной регрессии.

Значения коэффициентов регрессии исследуемой системы могут быть определены статистической обработкой экспериментальных данных, например, результатов испытаний некоторого числа опытных измерений с данными в пределах изучаемой области параметров ЭДС, емкости и т. п.

Из-за ограниченности числа экспериментов при статистической обработке можно получить неточные значения, а лишь приближенные статистические оценки коэффициентов модели. Свойства этих оценок будут зависеть от принятого метода обработки данных, от числа экспериментальных точек и их расположения в исследуемой области.

Иногда относительно рассматриваемых факторов выполняются некоторые предпосылки, основными из которых являются следующие [196]:

а) исследуемые свойства системы показателя оптимальности представляют собой независимые нормально распределенные случайные величины;

б) дисперсии значений показателя оптимальности в разных точках исследуемой области однородны;

в) независимые переменные (факторы) задаются с ошибкой, существенно меньшей ошибки определения показателя оптимальности.

Тогда для вычисления оценок коэффициентов принятой модели можно применять обычные методы регрессионного анализа [202].

Если, например, не выполняется предпосылка относительно соотношения ошибок определения выходного параметра, который можно обозначить как $y(x)$, и фиксирования x_i и ошибки эти оказываются величинами одного порядка, то для обработки данных используют методы конфлюэнтного анализа [196].

При исследовании зависимости продолжительности работы электропривода t_p на аккумуляторном питании лучше всего воспользоваться регрессионным анализом [196, 202].

Составим матрицу результатов плана эксперимента с пятью факторами (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Матрица плана и результатов эксперимента

| № опыта | Коды факторов | | | | | Значения факторов | | | | | Показатель оптимальности | | | | | |
|---------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-----|-----|--------------------------|-------|-------|----------|-------------|------------|
| | | | | | | | | | | | экспериментальные данные | | | | $t_{расч.}$ | Δt |
| | x_5 | x_4 | x_3 | x_2 | x_1 | w | k_t | k_c | C | U | t_1 | t_2 | t_3 | t_{cp} | | |
| 1 | - | - | - | - | - | 10 | 0,01 | 0,05 | 65 | 36 | 3,55 | 3,54 | 3,52 | 3,54 | 4,04 | 0,50 |
| 2 | + | - | - | - | - | 100 | 0,01 | 0,05 | 65 | 36 | 3,00 | 3,00 | 2,89 | 2,96 | 2,86 | -0,10 |
| 3 | - | + | - | - | - | 10 | 0,03 | 0,05 | 65 | 36 | 3,67 | 3,66 | 3,68 | 3,67 | 3,72 | 0,05 |
| 4 | + | + | - | - | - | 100 | 0,03 | 0,05 | 65 | 36 | 2,65 | 2,64 | 2,49 | 2,59 | 2,70 | 0,11 |
| 5 | - | - | + | - | - | 10 | 0,01 | 0,3 | 65 | 36 | 2,68 | 2,75 | 2,91 | 2,78 | 2,98 | 0,20 |
| 6 | + | - | + | - | - | 100 | 0,01 | 0,3 | 65 | 36 | 2,01 | 2,22 | 2,36 | 2,20 | 2,11 | -0,09 |
| 7 | - | + | + | - | - | 10 | 0,03 | 0,3 | 65 | 36 | 2,65 | 2,66 | 2,43 | 2,58 | 2,74 | 0,16 |
| 8 | + | + | + | - | - | 100 | 0,03 | 0,3 | 65 | 36 | 2,01 | 1,75 | 2,30 | 2,02 | 1,99 | -0,03 |
| 9 | - | - | - | + | - | 10 | 0,01 | 0,05 | 130 | 36 | 14,26 | 14,18 | 14,14 | 14,19 | 14,26 | 0,07 |
| 10 | + | - | - | + | - | 100 | 0,01 | 0,05 | 130 | 36 | 10,01 | 9,98 | 9,87 | 9,95 | 10,46 | 0,51 |
| 11 | - | + | - | + | - | 10 | 0,03 | 0,05 | 130 | 36 | 9,98 | 10,01 | 10,00 | 10,00 | 10,95 | 0,95 |
| 12 | + | + | - | + | - | 100 | 0,03 | 0,05 | 130 | 36 | 8,64 | 8,34 | 8,78 | 8,59 | 8,56 | -0,03 |
| 13 | - | - | + | + | - | 10 | 0,01 | 0,3 | 130 | 36 | 9,99 | 10,08 | 10,05 | 10,04 | 10,51 | 0,47 |
| 14 | + | - | + | + | - | 100 | 0,01 | 0,3 | 130 | 36 | 8,01 | 7,65 | 7,70 | 7,79 | 7,71 | -0,08 |
| 15 | - | + | + | + | - | 10 | 0,03 | 0,3 | 130 | 36 | 8,03 | 8,11 | 8,10 | 8,08 | 8,07 | -0,01 |
| 16 | + | + | + | + | - | 100 | 0,03 | 0,3 | 130 | 36 | 6,36 | 6,44 | 6,32 | 6,37 | 6,31 | -0,07 |
| 17 | - | - | - | - | + | 10 | 0,01 | 0,05 | 65 | 60 | 6,63 | 6,52 | 6,50 | 6,55 | 6,56 | 0,01 |
| 18 | + | - | - | - | + | 100 | 0,01 | 0,05 | 65 | 60 | 4,50 | 4,77 | 4,72 | 4,66 | 4,69 | 0,03 |
| 19 | - | + | - | - | + | 10 | 0,03 | 0,05 | 65 | 60 | 5,23 | 5,74 | 5,70 | 5,56 | 5,76 | 0,21 |
| 20 | + | + | - | - | + | 100 | 0,03 | 0,05 | 65 | 60 | 5,01 | 5,30 | 4,88 | 5,06 | 4,27 | -0,80 |
| 21 | - | - | + | - | + | 10 | 0,01 | 0,3 | 65 | 60 | 4,57 | 4,98 | 5,01 | 4,85 | 4,83 | -0,02 |
| 22 | + | - | + | - | + | 100 | 0,01 | 0,3 | 65 | 60 | 3,28 | 3,14 | 3,48 | 3,30 | 3,46 | 0,16 |
| 23 | - | + | + | - | + | 10 | 0,03 | 0,3 | 65 | 60 | 4,14 | 4,20 | 4,35 | 4,23 | 4,25 | 0,02 |
| 24 | + | + | + | - | + | 100 | 0,03 | 0,3 | 65 | 60 | 3,18 | 3,44 | 3,20 | 3,27 | 3,14 | -0,13 |
| 25 | - | - | - | + | + | 10 | 0,01 | 0,05 | 130 | 60 | 22,87 | 23,15 | 24,30 | 23,44 | 21,70 | -1,74 |
| 26 | + | - | - | + | + | 100 | 0,01 | 0,05 | 130 | 60 | 15,89 | 16,30 | 16,20 | 16,13 | 16,31 | 0,18 |
| 27 | - | + | - | + | + | 10 | 0,03 | 0,05 | 130 | 60 | 14,90 | 14,20 | 14,50 | 14,53 | 14,88 | 0,35 |
| 28 | + | + | - | + | + | 100 | 0,03 | 0,05 | 130 | 60 | 12,00 | 12,54 | 12,11 | 12,22 | 12,13 | -0,08 |
| 29 | - | - | + | + | + | 10 | 0,01 | 0,3 | 130 | 60 | 14,99 | 15,33 | 15,82 | 15,38 | 15,99 | 0,61 |
| 30 | + | - | + | + | + | 100 | 0,01 | 0,3 | 130 | 60 | 12,09 | 12,57 | 12,11 | 12,26 | 12,02 | -0,24 |
| 31 | - | + | + | + | + | 10 | 0,03 | 0,3 | 130 | 60 | 10,67 | 10,85 | 10,22 | 10,58 | 10,97 | 0,39 |
| 32 | + | + | + | + | + | 100 | 0,03 | 0,3 | 130 | 60 | 8,56 | 8,76 | 9,01 | 8,78 | 8,94 | 0,16 |

Так как матрица состоит из серий опытов, то определим среднюю дисперсию в соответствии с [127, 131]:

$$\sigma^2(t) = \frac{\sum_1^N \sum_1^m (t_{xi} - t_{cpj})^2}{N(m-1)}, \quad (5.4)$$

где m – номер серии; N – номер опыта.

Подставим данные из таблицы 5.4, получим:

$$\sigma^2(t) = 0,0549. \quad (5.5)$$

На основе расчетов уравнение регрессии линейного полинома примет вид:

$$y = 7,75 - 1,75\tilde{x}_1 - 0,99\tilde{x}_2 - 1,22\tilde{x}_3 + 4,01\tilde{x}_4 + 1,67\tilde{x}_5. \quad (5.6)$$

В различных литературных источниках [99, 107, 127, 131, 202, 196] предлагаются методы расчета, отличающиеся друг от друга. Вручную рассчитанные коэффициенты по рекомендациям [202], представленные в выражении (5.6), могут исказить отклик линейного полинома. Поэтому расчет коэффициентов уравнения данного линейного полинома проверим с помощью ЭВМ в программах MS Office Excel 2007 и StatSoft Statistica 10.0.

Данные, полученные в MS Office Excel 2007:

$$y = -6,05 + 0,14x_1 + 0,12x_2 - 9,79x_3 - 99,67x_4 - 0,02x_5. \quad (5.7)$$

Данные, полученные в StatSoft Statistica 10.0:

$$y = -6,05 + 0,13x_1 + 0,12x_2 - 9,78x_3 - 99,66x_4 - 0,02x_5. \quad (5.8)$$

Расхождения результатов расчетов, полученных вручную по рекомендациям [202], и данных расчета программ объясняются несколькими фактами: представленная функция не может быть описана линейным полиномом; выражения (5.7), (5.8) учитывают структуру кода фактора линейного полинома; в программах расчета статистических данных заложены аналитические расчеты и анализ представленных данных по реальным значениям фактора. Однако несмотря на функциональность этих программ, полученные уравнения регрессии линейного полинома грубо описывают расчетную зависимость с погрешностью значений до 150 % (рисунки 5.4).

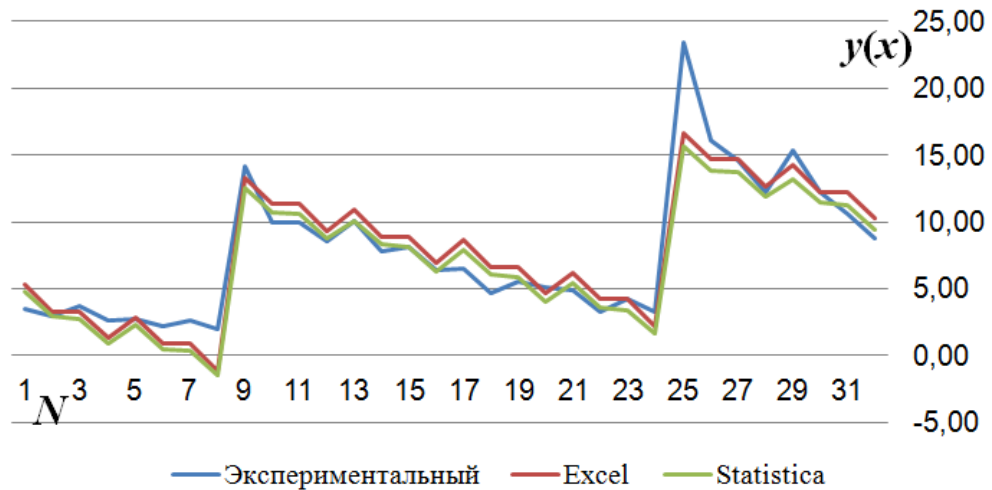


Рисунок 5.4 – Сравнение полученных уравнений регрессии линейного полинома

Как видно, линейным полиномом нельзя описать рассматриваемую функцию в связи с погрешностью более 50 % и по данным полинома можно проследить влияние мультиколлинеарных факторов [196], которые при дальнейшем рассмотрении допускается убрать. С учетом этого рассмотрим уравнение регрессии полинома второго порядка, исключив факторы x_3 и x_4 [127, 131, 202].

Рассмотрим и исследуем уравнение регрессии в виде квадратичного полинома типа:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{15}x_1x_5 + b_{25}x_2x_5 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{55}x_5^2. \quad (5.9)$$

Оценки коэффициентов регрессии полинома второго порядка рассчитывают с помощью многочлена Чебышева [127, 202] или таких уравнений, отклик которых не отражается в интервале $[-1; +1]$. Коэффициенты получают из условия обеспечения минимума суммы квадратов отклонений значений $y(x)$, предсказанных моделью для той или иной точки исследуемой области. В нашем случае эта область будет находиться в области фактически зафиксированного в этих точках среднего значения продолжительности работы электропривода t_p (метод наименьших квадратов [127]).

Составим матрицу для трехфакторного эксперимента с добавлением данных измерений выходного показателя при действии факторов на нулевом уровне (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Матрица плана трехфакторного эксперимента

| № опыта | Значение кода фактора | | | Значение фактора | | | Показатель оптимальности | | |
|---------|-----------------------|-------|-------|------------------|------------------|-----|--------------------------|-------------|------------|
| | x_1 | x_2 | x_5 | $E_{акб}, В$ | $C_N, А \cdot ч$ | w | $t_{ср}, Ч$ | $t_{расч.}$ | Δt |
| 1 | – | – | – | 36 | 65 | 10 | 3,44 | 3,25 | –0,19 |
| 2 | + | – | – | 60 | 65 | 10 | 5,01 | 5,16 | 0,15 |
| 3 | – | + | – | 36 | 130 | 10 | 9,98 | 10,35 | 0,37 |
| 4 | + | + | – | 60 | 130 | 10 | 14,95 | 14,83 | –0,12 |
| 5 | – | – | + | 36 | 65 | 100 | 2,66 | 2,33 | –0,33 |
| 6 | + | – | + | 60 | 65 | 100 | 3,65 | 3,76 | 0,11 |
| 7 | – | + | + | 36 | 130 | 100 | 7,77 | 7,87 | 0,10 |
| 8 | + | + | + | 60 | 130 | 100 | 11,13 | 11,69 | 0,56 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 48 | 97,5 | 55 | 7,56 | 7,17 | –0,39 |
| 10 | 0 | 0 | + | 48 | 97,5 | 100 | 6,62 | 6,27 | –0,35 |
| 11 | 0 | 0 | – | 48 | 97,5 | 10 | 8,37 | 8,39 | 0,02 |
| 12 | 0 | + | 0 | 48 | 130 | 55 | 11,1 | 11,16 | 0,06 |
| 13 | 0 | – | 0 | 48 | 65 | 55 | 3,86 | 3,55 | –0,31 |
| 14 | + | 0 | 0 | 60 | 97,5 | 55 | 8,43 | 8,60 | 0,17 |
| 15 | – | 0 | 0 | 36 | 97,5 | 55 | 6,01 | 5,60 | –0,41 |

Рассчитав коэффициенты регрессии полинома второго порядка, получим:

$$y = 7,47 + 1,33x_1 + 3,63x_2 - 0,99x_5 + 0,72x_1x_2 - 0,27x_1x_5 - 0,48x_2x_5 - 0,23x_1^2 + 0,03x_2^2 + 0,05x_5^2. \quad (5.10)$$

Оценим значимость полученных коэффициентов [119, 127, 148, 152, 194, 222]:

$$|b_i| \geq D_{bi} t', \quad (5.11)$$

где t' – коэффициент Стьюдента [127], для нашего случая $t' = 2$; D_{bi} – дисперсия, с которой определяли i -й коэффициент регрессии.

Сведем данные расчета дисперсий в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 – Выделение значимости коэффициентов уравнения регрессии полинома второго порядка

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Коэффициент уравнения (модуль) | b_0 | b_1 | b_2 | b_5 | b_{12} | b_{15} | b_{25} | b_{11} | b_{22} | b_{55} |
| | 7,47 | 1,33 | 3,63 | –0,99 | 0,72 | –0,27 | –0,49 | –0,23 | 0,03 | 0,05 |
| Коэффициент Стьюдента t' | 2,0 | | | | | | | | | |
| Дисперсия D_{bi} | 0,83 | 0,79 | 0,79 | 0,79 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,014 | 0,014 | 0,014 |
| Значимость | знач. | не знач. | знач. | не знач. | знач. | знач. | знач. | знач. | знач. | знач. |

Незначимые коэффициенты регрессии можно исключить из уравнения, тогда получим:

$$y = 7,47 + 3,63x_2 + 0,72x_1x_2 - 0,27x_1x_5 - 0,48x_2x_5 - 0,23x_1^2 + 0,03x_2^2 + 0,05x_5^2. \quad (5.12)$$

Проверим экспериментальные данные и сравним их с данными теоретического исследования по критерию Фишера [127] K_F с достаточной вероятностью 0,95:

$$K_F = \frac{D_a}{D_{cp}}, \quad (5.13)$$

где D_a – дисперсия адекватности; D_{cp} – средняя дисперсия;

$$D_a = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{расчi} - t_{срi})^2}{N - b}, \quad (5.14)$$

где b – количество коэффициентов уравнения регрессии;

$$D_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{j=1}^m (t_{расч} - t_{эj})^2}{mN}, \quad (5.15)$$

где m – число однотипных опытов.

Подставляя данные эксперимента и расчетные значения теоретических исследований, получим значение критерия Фишера [127]:

$$K_F = \frac{0,57}{0,24} = 2,375. \quad (5.16)$$

Сравним полученное значение критерия Фишера K_F с табличным значением критерия $K_{F\text{Таб.}}$ [127]. Полученная теоретическая модель считается адекватной в случае выполнения условия:

$$K_{F\text{Таб.}} > K_F. \quad (5.17)$$

В нашем случае $K_{F\text{Таб.}} = 2,45$ [127] при степени нижнего уровня свободы:

$$q_1 = N - b = 15 - 9 = 6 \quad (5.18)$$

и при степени верхнего уровня свободы $q_2 = 36$ с доверительной вероятностью 95 %:

$$2,45 > 2,375. \quad (5.19)$$

Таким образом, уравнение регрессии (5.12) адекватно описывает теоретические исследования зависимости продолжительности работы секции ДМ в пределах 6%-го расхождения расчетных и экспериментальных данных, а выполнение условия по критерию Фишера с оценкой доверительного интервала 95 % свиде-

тельствует о достаточном исследовании данного процесса и достоверности результатов, полученных в ходе эксперимента.

Полученное уравнение регрессии (5.12) адекватно отражает зависимость продолжительности работы секции на аккумуляторном питании от его параметров с допустимой погрешностью менее 8 %.

Коэффициенты регрессии указывают на степень влияния факторов значения выходного параметра – продолжительности работы электропривода. Задаваясь значениями факторов ($E_{AKB}; C_N; k_t; k_q; w$), можно получить значение продолжительности t_p . Графически изобразить изменение t_p от факторов возможно в 2- и 3-мерной системах координат путем допущения, что часть факторов неизменна и постоянна в рассматриваемом факторном пространстве. Например, изобразив в трехмерном пространстве зависимость $t_p = f(E_{AKB}; C_N)$, будем считать, что остальные факторы постоянны в диапазоне изменения ($E_{AKB}; C_N$), $w = \text{const}$. Построим поверхности откликов зависимостей $t_p = f(E_{AKB}; C_N)$; $t_p = f(w; C_N)$; $t_p = f(E_{AKB}; w)$ при других значениях факторов, считающихся неизменными и постоянными, а также определенных на нижнем (-1) и верхнем (+1) уровнях влияния (рисунки 5.5–5.7).

Для этого переведем полином (5.12) в физические значения факторов:

$$t_{pi} = 7,47 + \frac{3,63(C_{Ni} - 97,5)}{32,5} - \frac{0,27(E_{AKBi} - 48)}{12} \frac{(C_{Ni} - 97,5)}{32,5} - \frac{0,48(E_{AKBi} - 48)}{12} \frac{(w - 55)}{45} - 0,23 \left(\frac{E_{AKBi} - 48}{12} \right)^2 + 0,03 \left(\frac{C_{Ni} - 97,5}{32,5} \right)^2 + 0,05 \left(\frac{w - 55}{45} \right)^2. \quad (5.20)$$

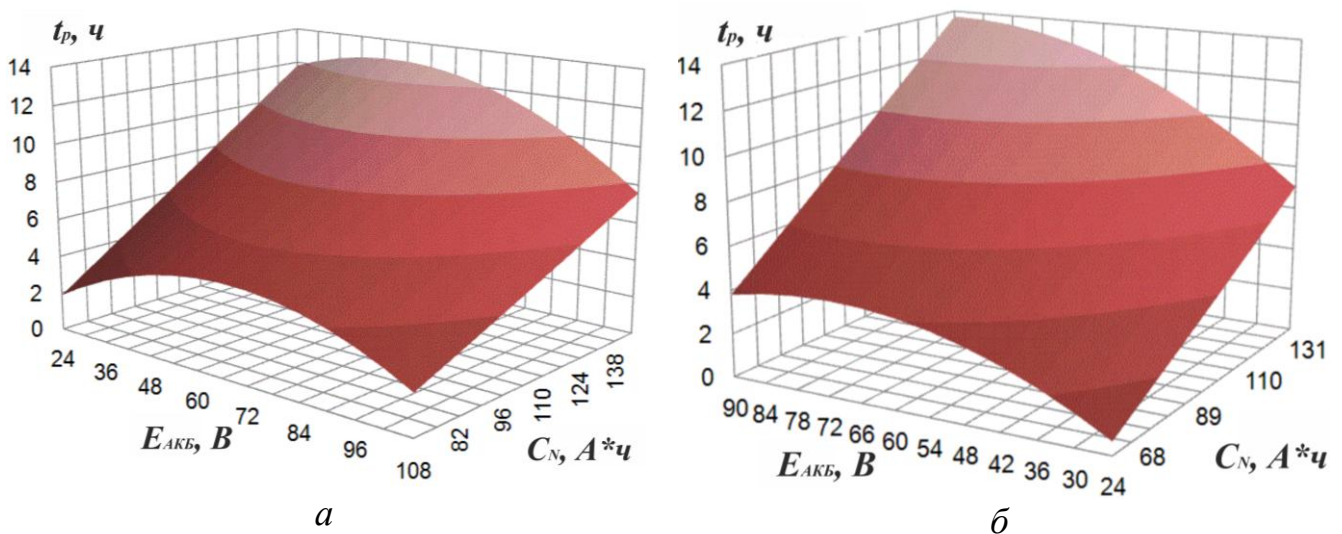


Рисунок 5.5 – Отклик $t_p = f(E_{AKB}; C_N)$:
а – $w (-1) = 10$; б – $w (+1) = 100$

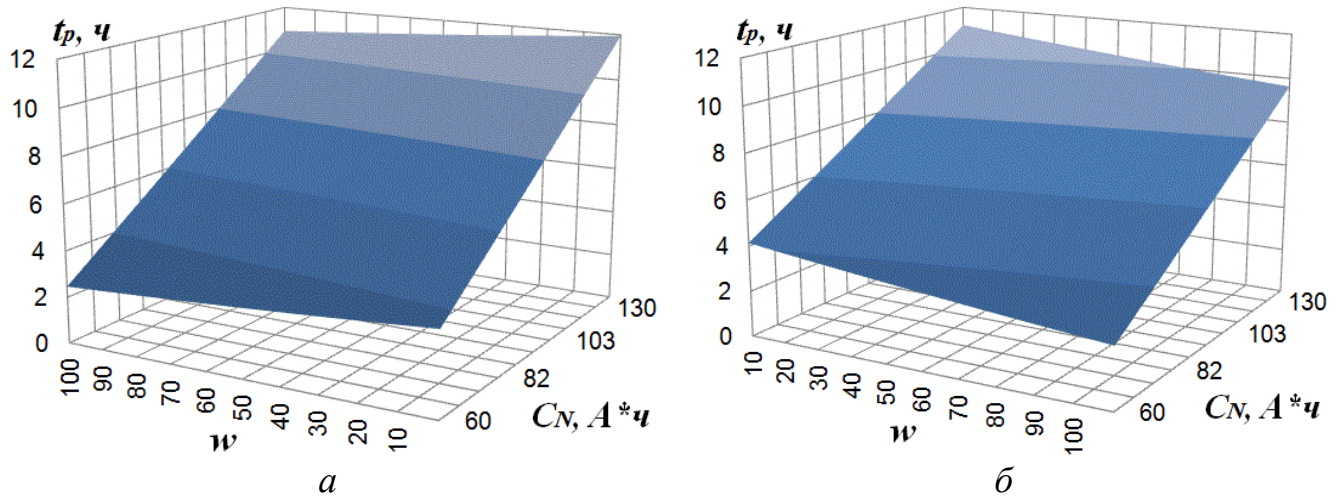


Рисунок 5.6 – Отклик $t_p = f(w; C_N)$:
 $a - E_{\text{АКБ}}(-1) = 36 \text{ В}$; $б - E_{\text{АКБ}}(+1) = 60 \text{ В}$

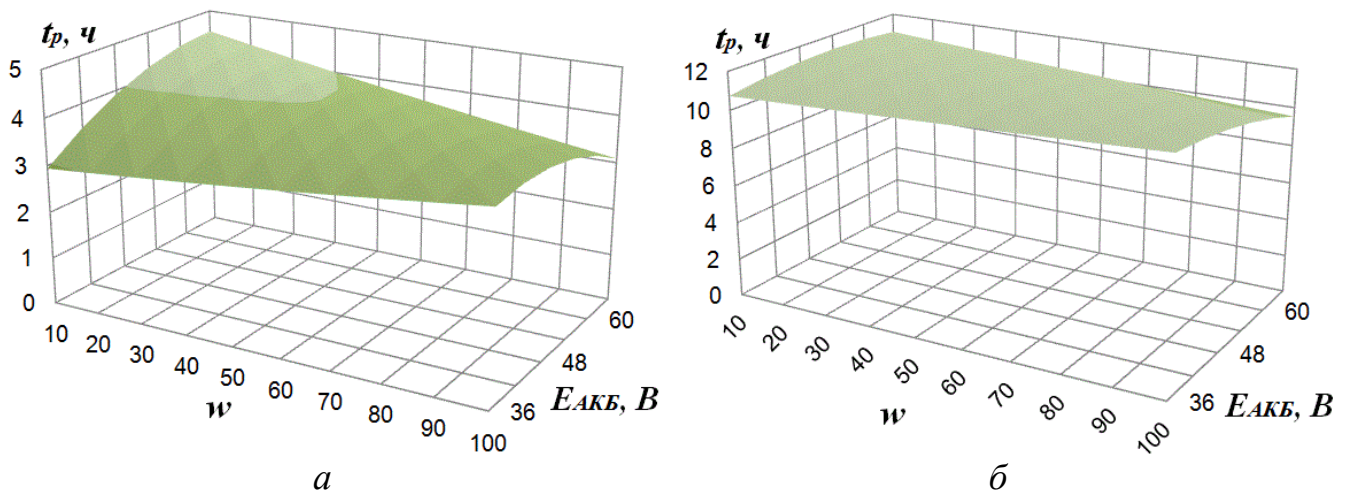


Рисунок 5.7 – Отклик $t_p = f(w; E_{\text{АКБ}})$:
 $a - C_N(-1) = 65 \text{ А} \cdot \text{ч}$; $б - C_N(+1) = 130 \text{ А} \cdot \text{ч}$

Таким образом, экспериментальные данные и их обработка в виде полученного уравнения регрессии (5.12), графиков поверхностей откликов показали, что погрешность сходимости теоретических и экспериментальных данных составляет не более 10 %, что также подтверждается выполнением условия по критерию Фишера. Наибольшее влияние на продолжительность оказывает напряжение аккумуляторной батареи – фактор x_1 .

Коэффициент временного действия тока искажает данные расчетов и эксперимента в силу того, что особенности ТАБ учитываются с точки зрения эмпирических зависимостей, которые связывают физические процессы получения электрической энергии с химическими процессами аккумуляторной батареи. Стоит отметить, что при создании большего напряжения батареи в пределах номиналь-

ного напряжения электродвигателя продолжительность работы ТАБ увеличивается не линейно, а экспоненциально. Вместе с этим сохраняется заявленный срок службы ТАБ и другие показатели надежности, изменение которых будет приниматься в дальнейших исследованиях.

5.2 Экспериментальные исследования динамической компенсации реактивной мощности

Особенностью современных электрифицированных дождевальных машин с источниками питания на переменном токе является повторно-кратковременный режим работы электропривода. Частые пуски в таком режиме не только создают негативные воздействия на источник переменного тока, но и требуют значительного запаса энергии. Поэтому экспериментальные исследования устройства динамической компенсации позволят оценить характер потребления энергии во время пуска и получить данные о выборе оптимальных параметров схемы включения устройства. Выполнение исследований заключается в сборке схемы устройства динамической компенсации реактивной мощности, а также в разработке стенда проверки параметров динамического режима (пускового режима) электродвигателя.

В эксперименте под динамическим режимом подразумевается режим пуска электродвигателя. Устройство действует только в этот период времени и после отключается. Как известно [117, 128, 203, 205, 207, 315], продолжительность пуска электродвигателя зависит от характеристик рабочего органа, установленного на валу, а также от особенностей технологического процесса, в котором участвует электропривод. Реактивная энергия, потребляемая ЭД, зависит от продолжительности пуска и параметров электродвигателя:

$$W_{PM} = f(Q_{дв}; t_{п}), \quad (5.21)$$

где $Q_{дв}$ – потребляемая реактивная мощность ЭД в момент пуска, квар; $t_{п}$ – продолжительность пуска, ч:

$$t_{п} = t_{н} - t_0, \quad (5.22)$$

где $t_{н}$ – момент времени выхода ЭД в номинальный режим частоты вращения, ч; t_0 – начальный момент запуска ЭД, ч.

Значения $Q_{дв}$, $t_{п}$ и $W_{рм}$ – переменные и зависят от многих факторов (особенностей магнитной системы ЭД, положений рабочих органов и т. п.).

Порядок выполнения эксперимента следующий.

На первом этапе необходимо рассчитать емкость конденсаторов, параметры выпрямительных диодов и собрать схему. Электролитические конденсаторы чувствительны к величине приложенного переменного напряжения, поэтому в схеме необходимо учесть не только максимальное действующее значение, но и амплитудное значение напряжения. Общая емкость схемы, собранной из нескольких конденсаторов, должна соответствовать величине реактивного тока нагрузки при пуске. Схема включения устройства должна содержать элемент регулирования продолжительности включения, чтобы можно было определить продолжительность и обеспечить наибольшее снижение реактивной мощности и повышение КПД пуска. Соответственно, задаваясь емкостью $C_{ук}$ (мкФ) и продолжительностью включения $t_{вкл}$ (с), необходимо определить долю снижения реактивной мощности $\Delta W_{рм}$ и повышение КПД пуска $\eta_{п}$.

Известно, что полярные электролитические конденсаторы, собранные совместно с диодами, допускается применять в цепях переменного тока ограниченное количество времени согласно [8, 10, 53, 117, 128, 138, 192, 252, 314]. Поэтому обязательным условием эксперимента будет контроль температуры конденсаторов в допустимых пределах. В продолжительном режиме действие переменного тока приводит к скоротечному разрушению электролита с выделением газа [117, 252] и отказу конденсатора.

В качестве испытуемого примем электродвигатель переменного тока типа УМС мощностью 550 Вт, напряжением 380 В, номинальным током 1,5 А и кратностью пускового тока $k_1 = 7$ [231]. В эксперименте будем считать, что нагрузка на электропривод неизменна, тогда зависимость снижения потребляемой пусковой реактивной энергии будет зависеть в основном от емкости $C_{ук}$, продолжительности пуска $t_{п}$ и продолжительности включения $t_{вкл}$ (с), например, реле, отключающего УДКРМ.

Для обработки результатов эксперимента воспользуемся теорией математического планирования эксперимента [51, 131, 202, 196]. В качестве выходных параметров будут выступать доля снижения реактивной мощности $\Delta W_{рм}$ и повыше-

ние КПД пуска $\eta_{\text{п}}$. Согласно [196], при двухфакторном эксперименте и двойном уровне варьирования число опытов:

$$N = 2^k = 2^2 = 4. \quad (5.23)$$

Примем трехсерийное измерение опытов ($m = 3$) для получения большей информации об объекте исследования. Обозначения и кодировка уровней варьирования факторов представлены в таблице 5.7. Значения факторов приняты из условий получения требуемых значений выходных параметров на нижнем и верхнем уровнях влияния.

Таблица 5.7. – Варьирование факторов УДКРМ

| Обозначение | Фактор | Коды и значения их пределов варьирования | | |
|-------------|---|--|------|-----|
| | | -1 | 0 | +1 |
| x_1 | Емкость конденсаторной батареи $C_{\text{ук}}$, мкФ | 31 | 40,5 | 50 |
| x_2 | Продолжительность включения устройства $t_{\text{вкл}}$, с | 2,0 | 2,5 | 3,0 |

После выполнения всех пунктов программы экспериментальных исследований были выполнены анализ полученных данных и их сравнение с положениями теоретического исследования.

Разработка стенда для исследования устройства динамической компенсации реактивной мощности в момент пуска электродвигателя

Заводы-изготовители выпускают полярные конденсаторы на напряжение 450–550 В постоянного тока. Их использование в цепях переменного тока возможно только в специальных схемах [117] и ограничено не действующим значением напряжения 380 В, а его амплитудным значением в $\sqrt{2}$ раз больше действующего, т. е. 537,4 В. С учетом этого следует собирать схему на полярных конденсаторах с запасом по напряжению. Этого можно добиться при последовательном соединении конденсаторов в батарею.

Устройство динамической компенсации реактивной мощности на полярных электролитических конденсаторах собирают по известной схеме [117] с добавлением цепи управления. Примем в эксперименте управление через реле времени (рисунок 5.8).

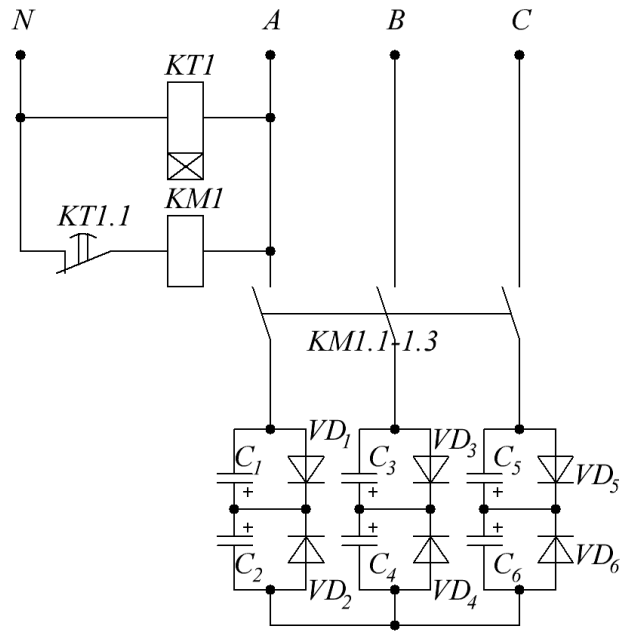


Рисунок 5.8 – Электрическая схема включения полярных электролитических конденсаторов $C_1 - C_6$ для динамической компенсации реактивной мощности, подключенных параллельно с выпрямительными диодам $VD_1 - VD_6$

В данной схеме при включении электродвигателя питание подается в цепь реле времени $KT1$ и катушки пускателя $KM1$, контакторы которого $KM1.1-1.3$ замыкают цепь батареи конденсаторов с диодами. Отключение происходит после срабатывания реле времени, которое размыкает свой контакт $KT1.1$ в цепи управления катушки $KM1$.

Рассчитаем емкость конденсаторов и параметры диодов по нагрузке для электродвигателя с пусковым током I_{Π} :

$$I_{\Pi} = kI_{\text{н}}, \quad (5.24)$$

где $I_{\text{н}}$ – номинальный ток электродвигателя, А.

Тогда емкость конденсатора через пусковой ток согласно [138]:

$$I_{\Pi} = U_{\text{сет}} \omega_{\text{сет}} C_{\text{УКП}}, \quad (5.25)$$

или пусковая расчетная емкость компенсирующего устройства:

$$C_{\text{УКП-расч}} = \frac{I_{\Pi}}{2\pi f_{\text{сет}} U_{\text{сет}}}, \quad (5.26)$$

где $U_{\text{сет}}$ – напряжение сети, В; $\omega_{\text{сет}}$ – радиальная частота сети, рад, $\omega_{\text{сет}} = 2\pi f_{\text{сет}}$; $f_{\text{сет}}$ – частота источника переменного тока, Гц.

Определив пусковой ток двигателя по выражению (5.24), рассчитаем емкость пускового конденсатора, необходимого для компенсации реактивной мощности:

$$C_{\text{УКп-расч}} = \frac{7 \cdot 1,5}{380 \cdot 314} = 88 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.} \quad (5.27)$$

На основе расчетной емкости необходимо подобрать стандартный типоразмерный конденсатор, ближайший по значению емкости, выпускаемый промышленностью. Поскольку потребление реактивной мощности электродвигателем не однородно в пусковой промежуток времени, в зависимости от величины емкости и продолжительности включения компенсирующего устройства вместе с компенсацией может наступить явление перекомпенсации (рисунок 5.9).

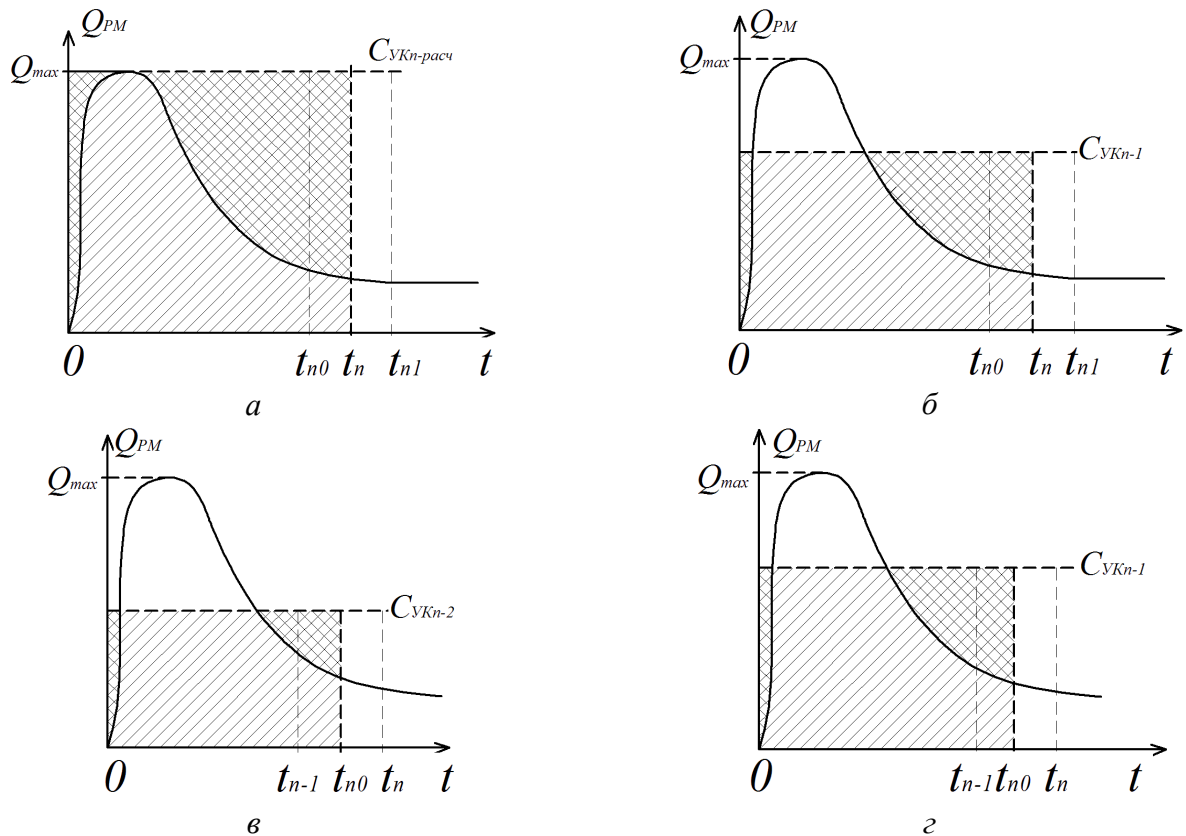


Рисунок 5.9 – Потребление и компенсация реактивной мощности при включении конденсаторов: *а* – расчетной емкости с продолжительностью включения t_n ; *б* – емкости, ближайшей к расчетной, выпускаемый промышленностью, на одну ступень ниже, с продолжительностью включения t_n ; *в* – емкости, ближайшей к расчетной, выпускаемый промышленностью, на две ступени ниже, с продолжительностью включения t_{n0} ; *г* – емкости, ближайшей к расчетной, выпускаемый промышленностью, на одну ступень ниже, с продолжительностью включения t_{n0}

Из рисунка 5.9 видно, что в некоторой области графика при включении расчетной емкости наступает явление перекомпенсации. Это вызывает дополнитель-

ное потребление реактивной энергии. С конденсаторами ближайшей стандартной емкости $C_{УКП-1}$ и $C_{УКП-2}$ перекомпенсация частично исключается. При этом если регулировать продолжительность действия конденсаторов от $t_{п-1}$ до $t_{п1}$ [3, 8, 41], то перекомпенсацию также можно частично исключить. Поэтому в эксперименте примем конденсаторы двух меньших значений от расчетной емкости, что будет задавать интервал варьирования этого фактора.

Рассмотрим в эксперименте схему включения компенсирующего устройства с управляемым реле, в котором можно регулировать продолжительность отсечки (срабатывания). Тогда интервал варьирования второго фактора будет определен диапазоном регулирования реле времени.

Соберем стенд для проверки параметров компенсирующего устройства и снижения потребления реактивной энергии в момент пуска, принципиальная электрическая схема которого представлена на рисунке 5.10, где указаны электродвигатель переменного трехфазного тока, компенсирующее устройство и приборы учета и контроля параметров.

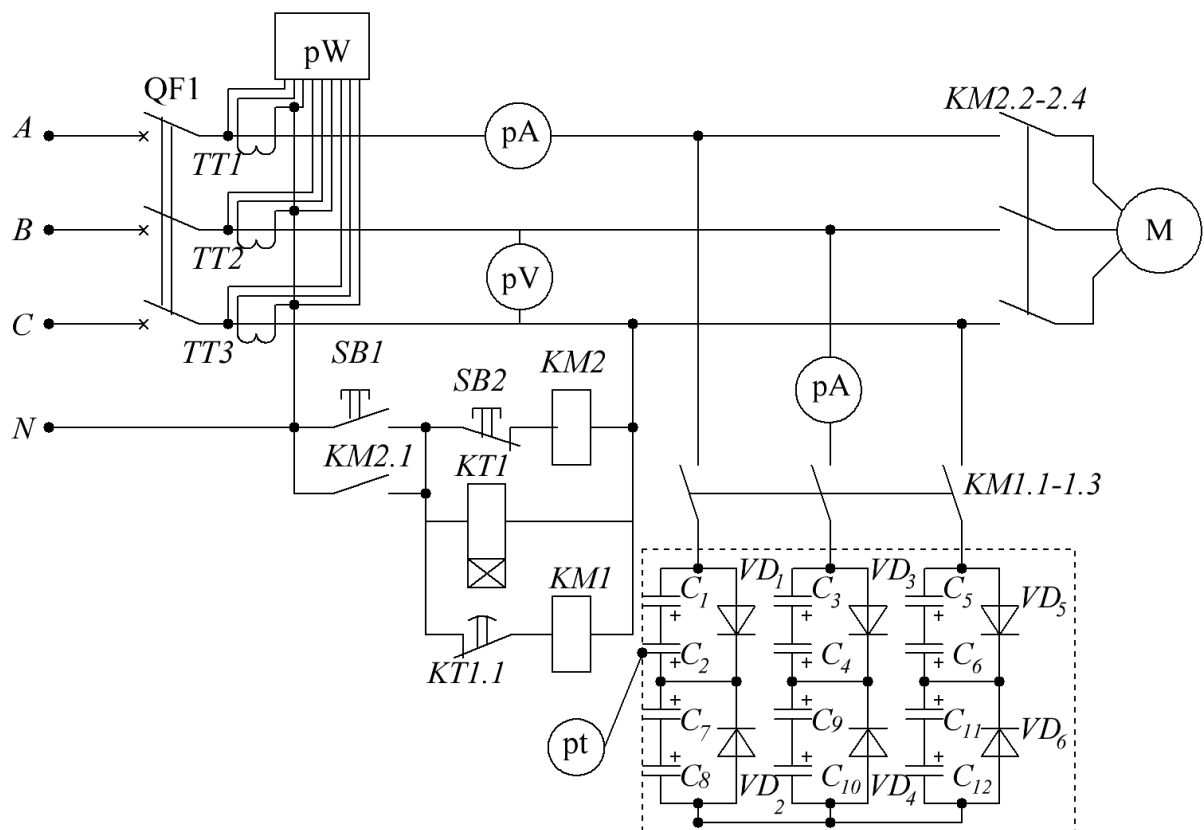


Рисунок 5.10 – Электрическая принципиальная схема лабораторного стенда для проверки параметров компенсирующего устройства

Стенд запитан от источника трехфазного переменного тока (фазы A , B , C) через автоматический выключатель $QF1$. Электродвигатель M и устройство динамиче-

ской компенсации запускают в работу нажатием кнопки пуск $SB1$, замыкая цепи питания катушек пускателей $KM2$ и $KM1$. Затем реле времени $KT1$ отключает устройство компенсации через промежуток времени $t_{п}$. С помощью приборов pA , pV , pT фиксируют показания соответственно тока, напряжения и температуры конденсаторной батареи. Через измерительные трансформаторы тока TT подключен счетчик pW , который фиксирует потребление из сети активной и реактивной энергии.

На основе данной схемы (см. рисунок 5.10), расчетов емкости конденсаторных батарей, выбора конденсаторов и диодов, магнитных пускателей, приборов, реле времени и других устройств собран лабораторный стенд для снятия характеристик, внешний вид которого представлен на рисунке 5.11.

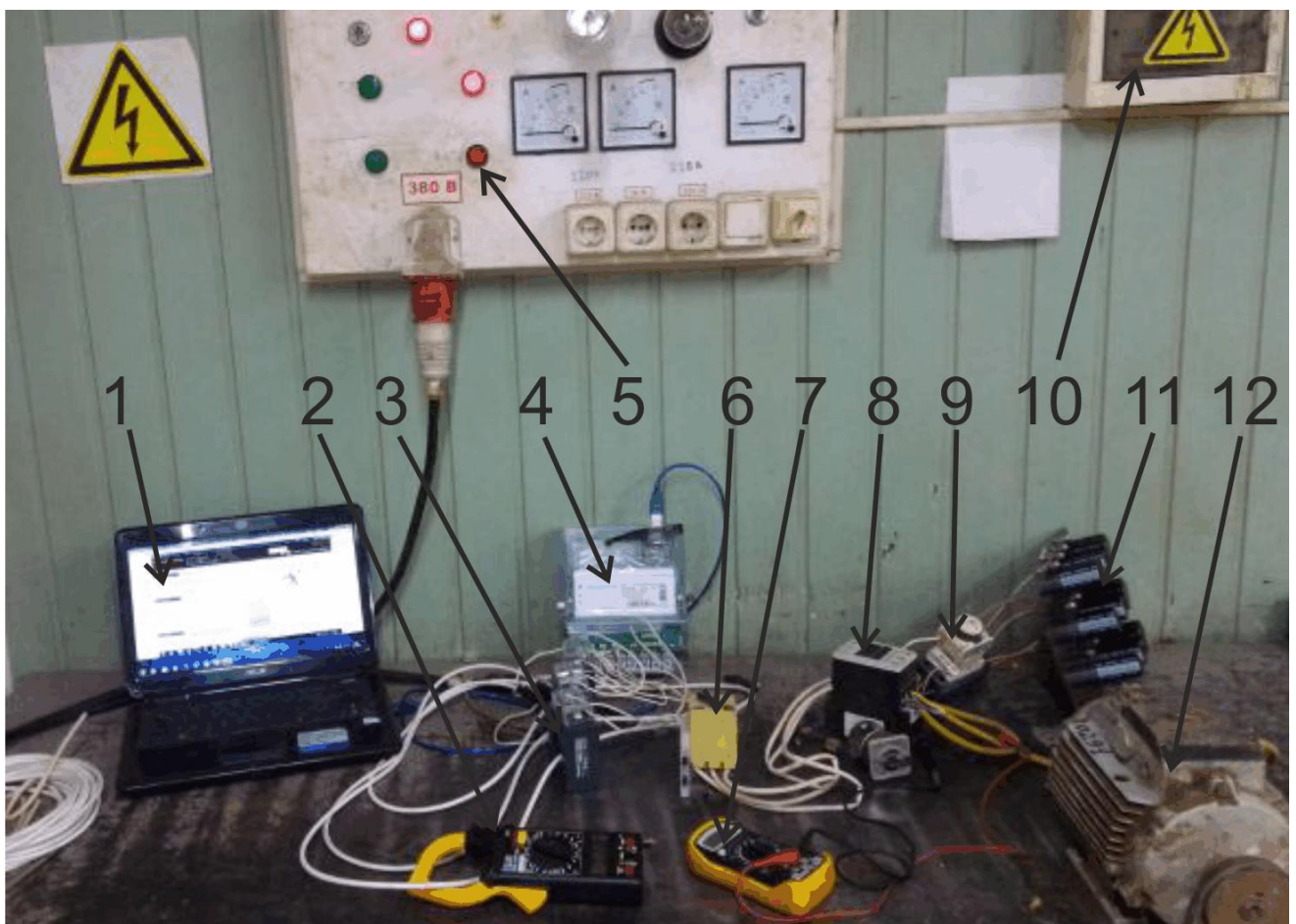


Рисунок 5.11 – Внешний вид стенда проверки устройства динамической компенсации реактивной мощности (УДКРМ) : 1 – ноутбук для фиксации показаний счетчика; 2 – токовые клещи; 3 – трансформаторы тока; 4 – счетчик электрической энергии; 5 – кнопки пуск/стоп; 6 – магнитный пускатель электродвигателя; 7 – вольтметр; 8 – магнитный пускатель УДКРМ; 9 – реле времени; 10 – щит питания с автоматическим выключателем; 11 – УДКРМ; 12 – электропривод с электродвигателем переменного тока

Маркировка и основные технические характеристики устройств, а также приборов измерения параметров представлены в таблице 5.8.

Все измерения проводили в соответствии с методиками и инструкциями по эксплуатации приборов.

Таблица 5.8 – Оборудование стенда проверки УДКРМ

| Наименование оборудования | Марка (маркировка) | Основные технические характеристики |
|--|--------------------------------|---|
| Электропривод с электродвигателем переменного тока | УМС 3.5 с PSG35-40 | Номинальное напряжение 380 В Номинальный ток 1,5 А Кратность пускового тока $k_1 = 7$ Частота вращения 1750/1450 мин ⁻¹ |
| Магнитный пускатель (2 шт.) | IEK КМИ 22510 | Напряжение катушки 220 В Номинальный ток гл. контактов 25 А Потребляемая мощность 10 ВА |
| Кнопки старт/стоп | Кнопка двойная TDM MPD2-11Y | Номинальное напряжение 220 В Номинальный ток 2,5 А |
| Вольтметр | АКИП Multimetr GDM 354A | Предел измерения напряжения АС 200–1000 В (2,5 %) |
| Амперметр (2 шт.) | PEAK HOLD 260D CLAMP METER | Предел измерения тока АС 0–20 А (2,5 %) |
| Реле времени | ЭКМ РВО-15 | Напряжение катушки АС DC24/ АС220 В Диапазон регулирования времени 0,1–99 с (5 %) Потребляемая мощность 1 В·А |
| Автоматический выключатель | IEK ВА47-29 3P C25 | Номинальный ток 25 А Токо-временная характеристика С |
| Электролитические конденсаторы (24 шт.) | Jamicon TX | Номинальное напряжение 450 В Максимальная температура T 105 °С, С 68 мкФ – 6 шт. С 47 мкФ – 6 шт. Номинальное напряжение 400 В Максимальная температура T 105 °С, С 100 мкФ – 12 шт. ($C_{УК-1} = 31$ мкФ; $C_{УК+1} = 50$ мкФ) |
| Выпрямительный диод | P-600 10A10 | Номинальное напряжение 1000 В, Максимальный ток 10 А, Максимальная температура 150 °С |
| Мультиметр с термопарой | Тестер МУ-64 | Диапазон измерения температуры °С –20...+1000 (К) |
| Текстолитовая плата | А-171 2,0 | Толщина 2,0 мм Размеры 150×100 мм |
| Трансформатор тока (3 шт.) | T-0,66 | Потребляемая мощность 5 В·А Класс точности 0,5 |
| Счетчик электроэнергии | «Меркурий 230» ART-01 RN | Номинальное напряжение 3×230 В, Номинальный ток 2,5–7,5 А Класс точности 1,0 |

В результате выполнения опытов были получены данные потребления активной и реактивной мощности в период пуска. Зная продолжительность пуска, т. е. за-

даваясь диапазоном настраиваемого реле, можно определить потребляемую реактивную энергию в момент пуска:

$$W_{\text{PM-п}} = Q_{\text{дв-п}} t_{\text{п}} \quad (5.28)$$

и КПД пуска:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{двГ1-п}}}{S_{\text{дв-п}}} = \frac{P_{\text{двГ1-п}}}{\sqrt{P_{\text{двГ1-п}}^2 + Q_{\text{дв-п}}^2}}, \quad (5.29)$$

где $S_{\text{дв-п}}$ – полная мощность, потребляемая электродвигателем в момент пуска, В·А.

Принцип работы электронных счетчиков электроэнергии основан на измерении параметров тока, напряжения и угла сдвига фаз между ними в единицу времени. На основе этого фиксируются значения активной $P_{\text{двГ1}}$ и реактивной $Q_{\text{дв}}$ мощности и сохраняются в универсальном конфигураторе счетчиков «Меркурий» (программа фиксации данных счетчиков) [194]. Тогда затраты реактивной энергии и КПД в период пуска можно определить косвенно по данным прямых измерений расчетным путем. Снижение потребления реактивной энергии на пуск:

$$\Delta W_{\text{PM-п}} = \frac{W_{\text{PM-п}} - W_{\text{PM-УК}}}{W_{\text{PM-п}}}, \quad (5.30)$$

где $W_{\text{PM-УК}}$ – реактивная энергия, скомпенсированная УДКРМ, кВар·ч.

Расчетное выражение через емкость и продолжительность пуска можно представить следующим образом:

$$\Delta W_{\text{PM-п}} = 1 - \frac{I_{\text{п}} U \sin(\omega t) t_{\text{п}} - C_{\text{УКн}} U^2 \omega t_{\text{п}}}{I_{\text{п}} U \sin(\omega t) t_{\text{п}}}. \quad (5.31)$$

КПД пуска увеличится на значение:

$$\Delta \eta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{двГ1-п}}}{\sqrt{P_{\text{двГ1-п}}^2 + (Q_{\text{дв-п}} - Q_{\text{УК}})^2}} - \frac{P_{\text{двГ1-п}}}{\sqrt{P_{\text{дв-п}}^2 + Q_{\text{дв-п}}^2}}, \quad (5.32)$$

где $Q_{\text{УК}}$ – реактивная мощность устройства динамической компенсации реактивной мощности, Вар.

В соответствии с методиками и методами измерений все полученные в ходе эксперимента данные принимаем с учетом погрешностей, а косвенные измерения

проводим руководствуясь правилами определения косвенных погрешностей [41, 247, 312].

Анализ и обработка экспериментальных данных

Составим матрицу результатов эксперимента с двумя факторами (таблица 5.9). Результаты в диапазоне $[-1; +1]$ не в полной мере характеризуют отклик, поэтому примем к рассмотрению данные отклика в нулевых точках факторов (0).

Таблица 5.9 – Матрица результатов плана двухфакторного эксперимента

| № опыта | Код фактора | | Значение фактора | | Результаты эксперимента, % | | | | $\Delta W_{\text{PM-п-расч.}}$, % | $\Delta W_{\text{расч.}} - \Delta W_{\text{Эсп}}$, % | $\Delta \Pi_{\text{Э}}$, % | $\Delta \Pi_{\text{Расч.}}$, % |
|---------|-------------|-------|-----------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|
| | x_1 | x_2 | $C_{\text{УК}}$, мкФ | $t_{\text{п}}$, с | $\Delta W_{\text{PM-пЭ1}}$ | $\Delta W_{\text{PM-пЭ2}}$ | $\Delta W_{\text{PM-пЭ3}}$ | $\Delta W_{\text{PM-п-сред}}$ | | | | |
| 1 | - | - | 31 | 2 | 44,2 | 39,8 | 42,0 | 42,0 | 43,5 | -1,49 | 10,1 | 2,1 |
| 2 | + | - | 50 | 2 | 77,7 | 74,7 | 88,8 | 80,4 | 70,1 | 10,25 | 62,0 | 6,3 |
| 3 | - | + | 31 | 3 | 48,3 | 45,1 | 42,7 | 45,4 | 43,5 | 1,88 | 14,5 | 2,1 |
| 4 | + | + | 50 | 3 | 80,0 | 69,9 | 74,3 | 74,7 | 70,1 | 4,59 | 6,8 | 6,3 |
| 5 | 0 | 0 | 40,5 | 2,5 | 62,2 | 61,6 | 57,6 | 60,5 | 56,8 | 3,65 | 9,2 | 3,6 |
| 6 | 0 | + | 40,5 | 3 | 63,2 | 60,2 | 63,4 | 62,3 | 56,8 | 5,45 | 4,0 | 3,6 |
| 7 | 0 | - | 40,5 | 2 | 64,0 | 73,8 | 76,6 | 71,5 | 56,8 | 14,65 | 44,8 | 3,6 |
| 8 | + | 0 | 50 | 2,5 | 66,7 | 74,2 | 71,9 | 70,9 | 70,1 | 0,79 | 50,4 | 6,3 |
| 9 | - | 0 | 31 | 2,5 | 40,1 | 44,8 | 49,2 | 44,7 | 43,5 | 1,21 | 17,7 | 2,1 |

Рассмотрим функцию зависимости изменения энергозатрат ΔW .

Выполним регрессионный анализ данных, представив на первом этапе функцию связи $\Delta W_{\text{PM-п}} = f(C_{\text{УК}}; t_{\text{п}})$ в виде линейного полинома:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (5.33)$$

где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

Используя данные расчетов программ MS Office Excel 2007 и StatSoft Statistica 10.0, получим уравнения регрессий:

$$\left. \begin{aligned} y_{\text{p}} &= 0,61 + 0,13\tilde{x}_1 - 0,002\tilde{x}_2; \\ y_{\text{Excel}} &= 0,041 + 0,016x_1 - 0,038x_2; \\ y_{\text{Stat}} &= 0,041 + 0,016x_1 - 0,038x_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.34)$$

Проверим расхождения расчетных данных регрессии и экспериментальных данных (рисунок 5.12).

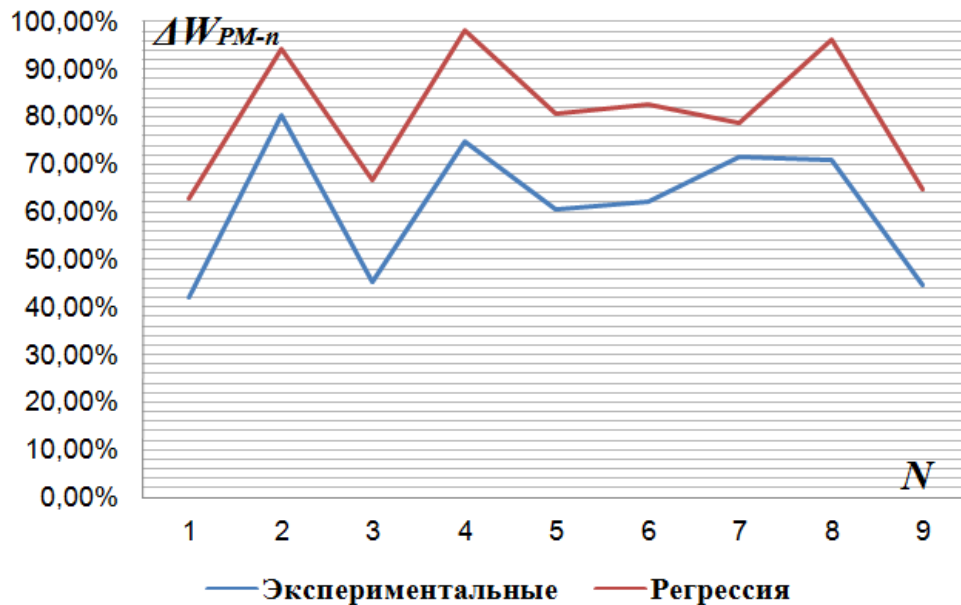


Рисунок 5.12 – Расхождения показателя снижения энергозатрат по уравнению регрессии и по экспериментальным данным

Максимальное расхождение данных составляет 25,27 %, однако контрольный эксперимент при значениях фактора $\tilde{x}_1 = 0, \tilde{x}_2 = 0$ показал $\Delta W_{PM-n} = 60,5$ %, что на 54 % больше значения коэффициента выходного параметра $\Delta W_{PM-n=0} = b_0 = 0,041 = 4,1$ %. Это означает, согласно [202], что искомая зависимость не может быть описана линейным полиномом. Поэтому продолжим эксперимент, представив исследуемую зависимость в виде полинома второго порядка:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2. \quad (5.35)$$

Рассчитав значения коэффициентов квадратичного полинома, получим уравнение вида:

$$y = 0,62 + 0,15x_1 - 0,019x_2 - 0,050x_1^2 + 0,040x_2^2 - 0,022x_1x_2. \quad (5.36)$$

Оценим значимость полученных коэффициентов по условию (5.11) с коэффициентом Стьюдента $t' = 2$ [127] и значений дисперсии D_{b_i} коэффициентов регрессии для квадратичного полинома в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Выделение значимости коэффициентов уравнения регрессии полинома второго порядка

| Коэффициент уравнения (модуль) | b_0 | b_1 | b_2 | b_{11} | b_{22} | b_{12} |
|--------------------------------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| | 0,620 | 0,156 | 0,019 | -0,050 | 0,040 | -0,022 |
| Коэффициент Стьюдента t' | 2,0 | | | | | |
| Дисперсия D_{bi} | 0,018 | 0,024 | 0,027 | 0,006 | 0,006 | 0,007 |
| Значимость | знач. | знач. | знач. | знач. | знач. | знач. |

Как видно из таблицы 5.10, незначимых коэффициентов регрессии нет.

Рассчитаем дисперсию адекватности D_a и среднюю дисперсию экспериментов серий D_{cp} по выражениям (5.14)–(5.15) и определим значение критерия Фишера [127]:

$$K_F = \frac{0,002}{0,0044} = 0,45; \quad (5.37)$$

$$3,24 > 0,45. \quad (5.38)$$

Получаем, что уравнение регрессии квадратичного полинома адекватно описывает результаты экспериментальных исследований зависимости снижения энергозатрат пускового режима в пределах 7%-го расхождения расчетных и экспериментальных данных. Выполнение условия по критерию Фишера с оценкой доверительного интервала 95 % свидетельствует о достаточном исследовании данного процесса компенсации реактивной мощности в момент пуска и сходимости результатов.

Полученное выражение регрессии (5.36) по сравнению с выражением теоретических исследований адекватно отражает зависимость снижения затрат с допустимой погрешностью менее 9 %.

Изобразим графически поверхность отклика показателя оптимальности уравнения регрессии. Задаваясь значениями факторов (C_{yKi} ; t_{ni}), получим значения показателя снижения затрат энергии (рисунок 5.13). Для этого переведем полином (5.36) в физические значения факторов:

$$\begin{aligned} \Delta W_{PM-ni} = & 0,62 + 0,15 \frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} - 0,019 \frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} - 0,050 \left(\frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} \right)^2 + \\ & + 0,004 \left(\frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} \right)^2 - 0,022 \left(\frac{C_{yKi} - 40,5}{9,5} \right) \left(\frac{t_{ni} - 2,5}{0,5} \right). \end{aligned} \quad (5.39)$$

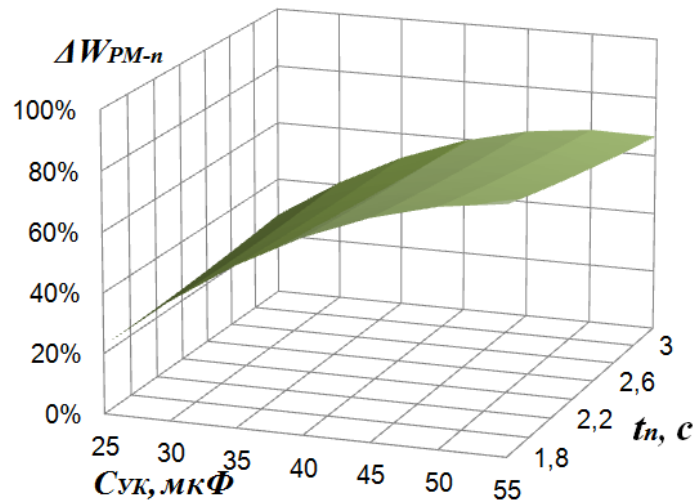


Рисунок 5.13 – Отклик $\Delta W_{PM-n} = f(C_{yк}; t_n)$

Анализируя полученный график, можно сделать вывод о том, что компенсация в динамическом режиме в максимальном виде достигается при емкости конденсатора $C_{yк-опт} = 50$ мкФ и продолжительности включения реле не более $t_{п-опт} = 2,0$ с, что способствует снижению энергетических затрат на пуск до $\Delta W_{PM-n-маx} = 84,1$ %. Это означает, что пусковой режим электродвигателя переменного тока, установленного в составе электропривода колес дождевальная машины, имеет продолжительность 2–3 с. Таким образом, устройство динамической компенсации с оптимальными параметрами способствует снижению энергозатрат на пуск в 6,3 раза. Представленная модель уравнения регрессии второго порядка (5.39) адекватна и согласуется с теоретическими исследованиями, которые сходятся с экспериментальными исследованиями с погрешностью около 9 %.

По полученным данным косвенных измерений повышения КПД пуска $\Delta\eta_{п}$ аналогичным образом составили уравнение квадратичного полинома:

$$y = 0,207 + 0,073x_1 - 0,152x_2 + 0,075x_1^2 - 0,020x_2^2 - 0,149x_1x_2. \quad (5.40)$$

На основе данных расчета значимости коэффициентов по методике [127, 202] получаем, что все представленные коэффициенты значимы, и их нельзя исключить.

Затем проверяем адекватность эксперимента по критерию Фишера. Рассчитаем дисперсию адекватности D_a и среднюю дисперсию экспериментов серий $D_{ср}$ по выражениям (5.14)–(5.15) и определим значение критерия:

$$K_F = \frac{102,5}{72,3} = 1,42; \quad (5.41)$$

$$3,24 > 1,42. \quad (5.42)$$

По данным выполнения условия (5.42) можно судить об адекватности эксперимента и вычисленной регрессионной модели полинома второго порядка. Сравнение показало, что полученные экспериментальные данные с расчетными расходятся не более чем на 10 %.

Изобразим поверхность отклика показателя повышения КПД пуска графически. Задавая значениями факторов ($C_{yк}; t_{п}$), получим значения показателя КПД (рисунок 5.14).

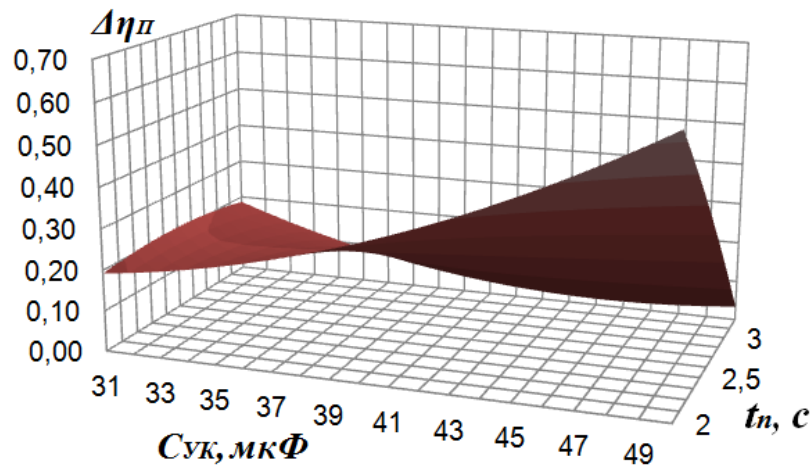


Рисунок 5.14 – Отклик $\Delta\eta_{п} = f(C_{yк}; t_{п})$

Квадратичный полином (5.40) переведем в физические значения факторов:

$$\begin{aligned} \Delta\eta_{пi} = & 0,207 + 0,073 \frac{C_{yкi} - 40,5}{9,5} - 0,152 \frac{t_{пi} - 2,5}{0,5} + 0,075 \left(\frac{C_{yкi} - 40,5}{9,5} \right)^2 - \\ & - 0,020 \left(\frac{t_{пi} - 2,5}{0,5} \right)^2 - 0,149 \left(\frac{C_{yкi} - 40,5}{9,5} \right) \left(\frac{t_{пi} - 2,5}{0,5} \right). \end{aligned} \quad (5.43)$$

На рисунке 5.14 видны границы оптимальных значений факторов, при которых можно добиться максимального КПД пуска электродвигателя ($C_{yк} = 50$ мкФ; $t_{п} = 2,0$ с).

Полученные данные эксперимента, их анализ в соответствии с теорией математического планирования свидетельствуют о том, что практическое применение устройства компенсации реактивной мощности в динамическом режиме пуска дает как прямой, так и интегральный эффект. Это заключается в снижении энергопотребления, повышении КПД пуска до 63,6 %, уменьшении негативного воздействия на электроприемники дождевальной машины, источник переменного тока (особенно переносных генераторов), а также в снижении общих потерь электроэнергии в электрической системе дождевальной машины.

5.3 Выводы по главе

1. В ходе 3-факторного эксперимента установлено, что на продолжительность работы электропривода на аккумуляторной батарее наибольшее влияние оказывают ЭДС и емкость батареи, а также число пусков электропривода. Полученное уравнение регрессии описывается полиномом второго порядка с погрешностью сходимости теоретических и экспериментальных данных не более 8 %.

2. Разработана, собрана и экспериментально проверена физическая модель устройства динамической компенсации реактивной мощности с реле времени в пусковом режиме электродвигателя опорной тележки ДМ с источником энергии на переменном токе. Наибольший эффект снижения потребления энергии в момент пуска (на 84,1 %) для электродвигателя мощностью 550 Вт достигается с помощью устройства динамической компенсации реактивной мощности при емкости конденсаторной батареи $C_{\text{УК-опт}} = 50 \text{ мкФ}$ и продолжительности включения $t_{\text{п-опт}} = 2,0 \text{ с}$.

6 ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВНЕДРЕНИЯ

В данном разделе представлены результаты внедрения и производственных испытаний, а также технико-экономические оценки применения алгоритма и программы выбора системы энергоснабжения ДМ, а также аккумуляторного источника питания, оснащенного солнечными панелями по сравнению с кабельной линией и переносным генератором.

Внедрение результатов проводили в два этапа. На первом из них для различных ДМ кругового действия внедряли алгоритм и программу поиска оптимальной системы энергоснабжения по исходным условиям эксплуатации, а также способов и средств, способствующих снижению энергетических затрат. На втором этапе осуществляли производственную проверку внедрения аккумуляторного способа питания с использованием возобновляемых источников энергии.

6.1 Производственные испытания и внедрение алгоритма и программы поиска оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин

Проверка программы поиска оптимальной системы энергоснабжения заключалась в сборе и обработке данных ДМ кругового действия различных производителей. Учитывали структуру энергопотребления ресурсов (топлива, электроэнергии) на единицу площади полива, характеристики условий работы и процесса полива, фиксировали значения потребления энергии. Разница между существующей системой энергоснабжения и рекомендуемой отражена в заключении и рекомендациях по комплектованию ДМ оптимальной системой с точки зрения наименьших энергозатрат.

Проверку ДМ на соответствие ее системы энергоснабжения оптимальным данным с точки зрения энергопотребления в конкретных условиях эксплуатации проводили на основе данных согласно [87].

Был разработан следующий план испытаний.

1. Цель – определить оптимальную систему энергоснабжения для дождевальных машин, эксплуатируемых в различных условиях. Принято число испытываемых образцов $N = 21$ ед.

2. Для всех дождевальных машин установить показатели эксплуатации согласно данным п. 3.1 – поливная норма z_1 , площадь поливного участка z_2 , давление потока жидкости на входе z_4 , удаленность от централизованного энергоснабжения z_5 и водоема z_6 , прирост прибыли z_7 .

3. Выполнить сбор, фиксацию и анализ данных потребления электроэнергии, горюче-смазочных материалов, затрат на техническую эксплуатацию ДМ за последние 2–4 года (2017–2020 гг.).

4. На основе алгоритма и программы выбора оптимальной системы рассчитать показатели эффективности различных систем энергоснабжения для каждой машины. По условию наименьшего показателя эффективности определить оптимальную систему энергоснабжения и сравнить ее с существующей системой дождевальной машины.

5. Для дождевальных машин, у которых существующая система энергоснабжения не совпадает с расчетной оптимальной системой, определить возможный диапазон снижения энергопотребления и затрат на техническую эксплуатацию.

Проверку проводили на сельскохозяйственных предприятиях, действующих как на территории Саратовской области (ООО «Наше дело» – г. Маркс Саратовской области; холдинг «Солнечные продукты» проект «Биотерра» – Марковский район Саратовской области; ООО «Мелиоративные машины» – г. Саратов, ИП Глава К(Ф)Х Вязовов – Екатериновский район Саратовской области), так и в других регионах (ООО «Стандарт-С» – Ачхой-Мартановский район Чеченской Республики; ООО «АПК «Райгород» – Светлоярский район Волгоградской области). Результаты испытаний представлены в таблице 6.1.

Новизна разработки заключается в том, что предлагаемая методика позволяет выбрать систему энергоснабжения дождевальной машины с наименьшими энергозатратами при конкретных агротехнических условиях полива (поливная или оросительная норма, площадь поливного участка, удаленность участка от во-

доема, от централизованной энергосистемы, входное давление жидкости на входе в трубопровод ДМ, вид выращиваемой культуры).

Производственные испытания данной программы проводили в период с 01.08.2018 г. по 01.11.2019 г. Они заключались в сборе данных условий, измерении параметров полива и расчете затрат энергии. Целью производственных испытаний являлась проверка параметров систем энергоснабжения дождевальных машин для сравнения показателей: эксплуатационных затрат z (руб.) и показателя надежности – интенсивность аварийных ситуаций λ_0 (ч^{-1}) дождевальных машин, работающих на механическом, гидравлическом и электрическом приводе и подтверждение границ применения систем энергоснабжения. Данные производственных испытаний подтверждены актами внедрения, а их воплощение подкреплено рисунками 6.1–6.4.

Программы испытаний выполняли с учетом особенностей каждого предприятия в отдельности, они отличались порядком выполнения. В ходе испытаний получены индивидуальные результаты и рекомендации по выбору и комплектации оптимальной системой энергоснабжения (*приложение Г*).



Рисунок 6.1 – Полив люцерны ДМ RKD в Чеченской Республике на предприятии ООО «Стандарт-С»

Таблица 6.1 – Результаты испытаний дождевальных машин на соответствие оптимальной системы энергоснабжения

| № образца | Существующая система энерго-снабжения | Условия эксплуатации | | | | | | | Потребление электроэнергии (ЭЭ, кВт·ч·10 ³) и горюче-смазочных материалов (ГСМ, л) | | | | | | Расчетные значения показателя эффективности k_1 , млрд руб. · кВт·ч | | | | | | Соответствие | Возможное снижение энергопотребления ΔW , % | |
|-----------|---------------------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|-----|---------|-----|---------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|---|-------|
| | | z ₁ | z ₂ | z ₃ | z ₄ | z ₅ | z ₆ | z ₇ | 2017 г. | | 2018 г. | | 2019 г. | | ГД | ГЦ | М | Экл | Эвл | Ээг | | | Эакб |
| | | | | | | | | | ЭЭ | ГСМ | ЭЭ | ГСМ | ЭЭ | ГСМ | | | | | | | | | |
| 1 | Мех. привод | 140 | 32 | 1,1 | 0,4 | 1,8 | 2,5 | 100 | 624 | 450 | 664 | 488 | 401 | 382 | 121 | 122 | 145 | 141 | 141 | 151 | 152 | не со-отв. | 31–39 |
| 2 | Кабельная линия | 600 | 60 | 4,8 | 0,25 | 11,0 | 3,0 | 155 | 711 | 10 | 488 | 9 | 645 | 10 | 288 | 294 | 345 | 211 | 213 | 254 | 269 | соотв. | – |
| 3 | Диз. генератор | 600 | 48 | 3,8 | 0,25 | 3,9 | 0,6 | 130 | 388 | 312 | 390 | 315 | 340 | 288 | 203 | 203 | 221 | 199 | 199 | 198 | 199 | соотв. | – |
| 4 | Гид. привод + ГЦ | 800 | 82 | 5,5 | 0,7 | 4,5 | 0,9 | 234 | 1440 | 18 | 1120 | 25 | 1298 | 13 | 388 | 366 | 412 | 354 | 354 | 353 | 354 | не со-отв. | 12–21 |
| 5 | Гид. генератор + ЭП | 500 | 48 | 4,0 | 0,55 | 4,0 | 0,8 | 188 | 1008 | 14 | 1220 | 18 | 885 | 18 | 242 | 245 | 287 | 266 | 265 | 271 | 278 | не со-отв. | 7–14 |
| 6 | Кабельная линия | 880 | 112 | 6,5 | 0,45 | 1,4 | 1,0 | 159 | 615 | 12 | 625 | 12 | 505 | 10 | 442 | 441 | 501 | 399 | 401 | 440 | 440 | соотв. | – |
| 7 | Кабельная линия | 880 | 112 | 6,5 | 0,45 | 1,7 | 1,0 | 159 | 554 | 9 | 568 | 14 | 577 | 11 | 438 | 439 | 491 | 382 | 396 | 398 | 400 | соотв. | – |
| 8 | Кабельная линия | 880 | 112 | 6,5 | 0,45 | 0,8 | 2,0 | 162 | 614 | 11 | 621 | 10 | 508 | 13 | 457 | 457 | 511 | 344 | 344 | 398 | 399 | соотв. | – |
| 9 | Кабельная линия | 880 | 112 | 6,5 | 0,35 | 1,3 | 2,0 | 164 | 555 | 7 | 540 | 8 | 500 | 14 | 458 | 459 | 513 | 349 | 350 | 397 | 397 | соотв. | – |
| 10 | Кабельная линия | 880 | 112 | 6,5 | 0,32 | 1,9 | 2,5 | 159 | 611 | 16 | 614 | 10 | 520 | 11 | 454 | 455 | 535 | 358 | 359 | 400 | 402 | соотв. | – |
| 11 | Диз. генератор + ЭП | 662 | 83 | 4,8 | 0,31 | 12,2 | 7,1 | 284 | 515 | 410 | 488 | 390 | 470 | 380 | 499 | 502 | 388 | 384 | 378 | 376 | 353 | не со-отв. | 22–30 |
| 12 | Кабельная линия | 662 | 83 | 5,1 | 0,29 | 11,2 | 2,3 | 320 | 616 | 8 | 615 | 11 | 525 | 10 | 412 | 421 | 359 | 355 | 355 | 356 | 359 | соотв. | – |
| 13 | Кабельная линия | 662 | 83 | 5,1 | 0,33 | 11,2 | 2,2 | 322 | 554 | 12 | 558 | 13 | 477 | 9 | 428 | 434 | 493 | 382 | 386 | 388 | 388 | соотв. | – |
| 14 | Кабельная линия | 662 | 83 | 5,1 | 0,32 | 8,2 | 2,4 | 314 | 618 | 13 | 621 | 13 | 508 | 11 | 444 | 445 | 497 | 318 | 322 | 328 | 329 | соотв. | – |
| 15 | Кабельная линия | 662 | 83 | 4,8 | 0,27 | 8,3 | 2,5 | 98 | 555 | 20 | 540 | 8 | 500 | 14 | 458 | 458 | 503 | 349 | 351 | 367 | 360 | соотв. | – |
| 16 | Диз. генератор + ЭП | 615 | 95 | 4,8 | 0,27 | 5,2 | 4,1 | 280 | 611 | 406 | 399 | 399 | 486 | 26 | 455 | 455 | 515 | 352 | 353 | 395 | 356 | не со-отв. | 32–38 |
| 17 | Диз. генератор | 615 | 95 | 5,2 | 0,27 | 8,7 | 4,0 | 84 | 515 | 410 | 488 | 390 | 470 | 380 | 445 | 446 | 438 | 359 | 359 | 353 | 353 | соотв. | – |
| 18 | Кабельная линия | 615 | 95 | 5,2 | 0,31 | 8,6 | 2,4 | 229 | 615 | 12 | 625 | 12 | 505 | 10 | 488 | 487 | 550 | 411 | 418 | 419 | 419 | соотв. | – |
| 19 | Кабельная линия | 615 | 95 | 5,2 | 0,31 | 13,8 | 2,5 | 220 | 554 | 10 | 568 | 14 | 577 | 11 | 501 | 499 | 482 | 476 | 476 | 477 | 479 | соотв. | – |
| 20 | Кабельная линия | 685 | 88 | 5,5 | 0,32 | 15,4 | 4,9 | 340 | 614 | 11 | 621 | 10 | 508 | 8 | 511 | 509 | 499 | 478 | 480 | 479 | 479 | соотв. | – |
| 21 | Гид. привод + ГЦ | 800 | 99 | 5,8 | 0,7 | 22,3 | 6,0 | 200 | 1555 | 20 | 1540 | 35 | 1784 | 24 | 699 | 644 | 553 | 508 | 508 | 511 | 509 | не со-отв. | 37–40 |



Рисунок 6.2 – Полив кукурузы ДМ «КАСКАД» в Саратовской области на предприятии УНПО «Поволжье» СГАУ



Рисунок 6.3 – Полив пшеницы ДМ Valley в Волгоградской области на предприятии ООО «АПК «Райгород»



Рисунок 6.4 – Полив кукурузы ДМ Valley в Саратовской области на предприятии ООО «Наше дело»

6.2 Результаты экспертных оценок показателей системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия

Экспертные оценки позволяют получить данные весовых коэффициентов в результате статистической обработки результатов опроса экспертов [157, 166, 182, 238, 295]. В качестве экспертов привлекают специалистов из научной и производственной сфер, компетентных в исследуемой области. К данному методу прибегают в тех случаях, когда надежный ответ на интересующий важный вопрос (или совокупность вопросов) не может быть получен другими более объективными методами (например, методами экспериментального или теоретического исследования) [99, 131].

Сущность эмпирического метода экспертных оценок заключается в том, чтобы определить значения весовых показателей и их рангов при выборе оптимального варианта системы по критерию минимума энергопотребления. Большой вес показателя характеризует его приоритет при выборе, а ранг показателя указывает на его влияние

относительно других показателей по принципу «лучше – хуже». Ранг присваивают показателю порядковыми номерами: лучшему – «1», следующему – «2» и затем – «3».

Из основных показателей качества системы энергоснабжения ДМ можно принять к рассмотрению для определения рангов и весов только те, которые наиболее значимы и оказывают решающее влияние на выбор варианта. К таким показателям относятся: стоимость системы; вероятность отказа (показатель надежности); показатель потерь энергии (показатель КПД).

Весовые коэффициенты в сумме для совокупности показателей качества должны удовлетворять условию:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= v_1 k'_3 + v_2 k'_4 + v_3 k'_5 + M_{k-z}, \\ \sum_{i=1}^n v_i &= 1, \\ v_i &> 0, \\ n &= 3. \end{aligned} \right\}, \quad (6.1)$$

где k_1 – обобщающий критерий эффективности; k_3, k_4, k_5 – соответственно показатели КПД, стоимости и надежности; v_i – весовой коэффициент; M_{k-z} – параметр, зависящий от других показателей.

Абсолютные значения весов выставляются экспертами по 100-балльной шкале, где «100» – максимум, а «0» – минимум. Все решения экспертов фиксируют и обрабатывают.

Примем две группы экспертов, в первую группу (I) будут входить специалисты, имеющие большой опыт конструирования и разработки дождевальных машин кругового действия, а во вторую (II) – специалисты, имеющие большой опыт эксплуатации этих машин. Каждому эксперту присваивают номер, так как опрос ведется анонимно. После обработки результатов определяют степень согласованности оценок.

Результаты опроса экспертов приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Абсолютные оценки весов

| Номер группы экспертов | Номер эксперта | Оценки показателей системы, баллы | | |
|------------------------|----------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | | КПД k_3 $\eta' (B_1)$ | стоимость k_4 $C (B_2)$ | надежность k_5 $Q_0(t) (B_3)$ |
| I | 1 | 90 | 70 | 60 |
| | 2 | 90 | 100 | 70 |
| | 3 | 80 | 100 | 60 |
| | 4 | 70 | 60 | 50 |
| | 5 | 80 | 90 | 70 |
| II | 6 | 90 | 100 | 70 |
| | 7 | 100 | 90 | 80 |
| | 8 | 80 | 70 | 40 |
| | 9 | 60 | 80 | 70 |
| | 10 | 90 | 100 | 50 |

Определим относительные значения весов по формуле:

$$B_i = \frac{B'_i}{\sum_{i=1}^3 B'_i}, \quad (6.2)$$

а также их средние значения (таблица 6.3).

Рассчитаем отклонения каждого частного веса от его среднего значения (таблица 6.4).

Таблица 6.3 – Относительные частные значения весов

| Номер группы экспертов | Номер эксперта | Относительные значения весов показателей системы | | |
|------------------------------|----------------|--|----------|----------|
| | | B_1 | B_2 | B_3 |
| I | 1 | 0,409091 | 0,318182 | 0,272727 |
| | 2 | 0,409091 | 0,454545 | 0,318182 |
| | 3 | 0,363636 | 0,454545 | 0,272727 |
| | 4 | 0,318182 | 0,272727 | 0,227273 |
| | 5 | 0,363636 | 0,409091 | 0,318182 |
| II | 6 | 0,409091 | 0,454545 | 0,318182 |
| | 7 | 0,454545 | 0,409091 | 0,363636 |
| | 8 | 0,363636 | 0,318182 | 0,181818 |
| | 9 | 0,272727 | 0,363636 | 0,318182 |
| | 10 | 0,409091 | 0,454545 | 0,227273 |
| Среднее значение \bar{B}_i | | 0,377273 | 0,390909 | 0,281818 |

Таблица 6.4 – Отклонения частных весов от среднего значения

| Номер группы экспертов | Номер эксперта | ΔB_1 | ΔB_2 | ΔB_3 | $\sum_{i=1}^3 \Delta B_i $ |
|------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| I | 1 | 0,031818 | -0,07273 | -0,00909 | 0,113636 |
| | 2 | 0,031818 | 0,063636 | 0,036364 | 0,131818 |
| | 3 | -0,01364 | 0,063636 | -0,00909 | 0,086364 |
| | 4 | -0,05909 | -0,11818 | -0,05455 | 0,231818 |
| | 5 | -0,01364 | 0,018182 | 0,036364 | 0,068182 |
| II | 6 | 0,031818 | 0,063636 | 0,036364 | 0,131818 |
| | 7 | 0,077273 | 0,018182 | 0,081818 | 0,177273 |
| | 8 | -0,01364 | -0,07273 | -0,1 | 0,186364 |
| | 9 | -0,10455 | -0,02727 | 0,036364 | 0,168182 |
| | 10 | 0,031818 | 0,063636 | -0,05455 | 0,15 |

Определим вариацию оценок экспертов по формуле:

$$v_{\text{вар-}i} = \frac{\sqrt{\sigma_i^2}}{B_i}, \quad (6.3)$$

где σ_i^2 – дисперсия оценки i -го веса j -м экспертом:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{эк}}} \Delta B_i^2}{N_{\text{эк}} - 1}, \quad (6.4)$$

где $N_{\text{эк}}$ – число экспертов.

По значению вариации оценивают надежность полученных результатов. Результаты считаются хорошими, если (таблица 6.5):

$$v_{\text{вар}} < 0,2. \quad (6.5)$$

Таблица 6.5 – Значения вариаций данных оценок экспертов

| | ΔB_1 | ΔB_2 | ΔB_3 |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| $v_{\text{вар-}i}$ | 0,139699 | 0,175063 | 0,198269773 |

Полученные данные свидетельствуют о том, что результаты оценки весовых коэффициентов можно считать хорошими, так как все значения вариации удовлетворяют условию (6.5).

Для определения степени согласованности оценок составим по данным таблиц 6.2–6.5 таблицу рангов по принципу согласно [157, 166]: наибольшему весу присваивают наименьший ранг. В таблице 6.6 приведены ранги для каждого эксперта, сумма рангов, среднее значение и отклонение от среднего значения.

Таблица 6.6 – Ранги решений экспертов

| Номер группы экспертов | Номер эксперта | Оценки показателей системы, баллы | | |
|---|----------------|---|---|---|
| | | КПД k_3 η' (B ₁) | стоимость k_4 С (B ₂) | надежность k_5 $Q_0(t)$ (B ₃) |
| I | 1 | 3 | 2 | 1 |
| | 2 | 2 | 3 | 1 |
| | 3 | 2 | 3 | 1 |
| | 4 | 3 | 2 | 1 |
| | 5 | 2 | 3 | 1 |
| II | 6 | 2 | 3 | 1 |
| | 7 | 3 | 2 | 1 |
| | 8 | 3 | 2 | 1 |
| | 9 | 1 | 3 | 2 |
| | 10 | 2 | 3 | 1 |
| Сумма рангов Σr_{ai} | | 23 | 26 | 11 |
| Среднее значение \bar{R}_{ai} | | 20 | | |
| Отклонение от среднего значения ΔR_{ai} | | 3 | 6 | -9 |

Результаты экспертных оценок получились такими, что ни один из экспертов не дал одинаковое количество баллов двум любым показателям качества системы энергоснабжения. Отсюда нет одинаковых рангов показателей. Тогда степень согласованности мнений оценок экспертов определим по упрощенному выражению [157, 166, 238]:

$$W_{\text{кон}} = \frac{12 \sum_{i=1}^{m_k} \Delta R_{ai}^2}{N_{\text{ЭК}}^2 (m_k^3 - m_k)}, \quad (6.6)$$

где m_k – число показателей качества.

Степень согласованности называют коэффициентом конкордации, или коэффициентом согласия, значения которого находятся в интервале от 0 до 1. Чем больше коэффициент согласия, тем согласованней мнения экспертов и, соответственно, адекватней полученные данные на соответствие реальным данным.

$$W_{\text{кон}} = \frac{12 \cdot (3^2 + 6^2 + (-9)^2)}{10^2 (3^3 - 3)} = 0,630.$$

Полученное значение коэффициента конкордации не является твердым, так как оно зависит от мнений экспертов. Если в данную проверку включить еще несколько экспертов или заменить часть этих экспертов другими, то степень согла-

сованности будет другой. Это случайная величина. Поэтому определим уровень значимости или вероятность того, что мнения экспертов совпадут при аналогичном исследовании.

Если считать квадрат отклонения от среднего значения суммы рангов показателя определяемой величиной, то коэффициент конкордации как случайная величина описывает распределение Пирсона (частный случай гамма-распределения) [238].

Определим распределение хи-квадрат χ^2 [238] с десятью степенями свободы (так как в исследовании участвуют десять экспертов):

$$\chi^2 = \frac{12 \sum_{i=1}^{m_k} \Delta R_{ai}^2}{N_{\text{эк}} m_k (m_k + 1)}. \quad (6.7)$$

Тогда

$$\chi^2 = 12,6.$$

По данному значению хи-квадрата находим степень значимости $\alpha_{\text{зн}}$ по графику функции [131, 157, 238] распределения со степенью свободы $(N_{\text{эк}} - 1)$:

$$\alpha_{\text{зн}} = 0,18.$$

Вероятность получения повторного результата:

$$1 - \alpha_{\text{зн}} = 1 - 0,18 = 0,82.$$

С вероятностью 82 % получения повторного результата или близкого к нему значение коэффициента конкордации можно считать удовлетворительным.

При проверке полученных результатов также сравнивают данные групп экспертов, т. е. проверяют согласованность мнений проектировщиков и разработчиков дождевальнoй машины (в нашем случае – экспертов в научно-образовательной деятельности) с мнениями экспертов, занимающихся эксплуатацией машин (опытных мелиораторов). Для этого определяют коэффициент ранговой корреляции [131, 157, 238]:

$$\rho_{\text{кор}} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^{m_k} (r_{aiI} - r_{aiII})^2}{m_k (m_k^2 - 1)}, \quad (6.8)$$

где r_{aiI} и r_{aiII} – соответствующие ранги I и II групп экспертов (таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Результирующие ранги

| Оценки экспертов | Показатель k_3 | Показатель k_4 | Показатель k_5 |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>Группа I</i> | | | |
| Сумма рангов | 12 | 13 | 5 |
| Результирующий ранг | 2 | 3 | 1 |
| <i>Группа II</i> | | | |
| Сумма рангов | 11 | 13 | 6 |
| Результирующий ранг | 2 | 3 | 1 |

Коэффициент ранговой корреляции:

$$\rho_{\text{кор}} = 1 - \frac{6 \cdot ((2-2)^2 + (3-3)^2 + (1-1)^2)}{3 \cdot (3^2 - 1)} = 1,0.$$

Значение $\rho_{\text{кор}} = 1,0$ свидетельствует о том, что мнения экспертов разных групп абсолютно одинаково указывают на ранговую принадлежность показателей качества системы.

Таким образом, с учетом совокупности полученных весовых коэффициентов с вариацией значений, ранговой принадлежности показателей и обработки статистических данных результат экспертных оценок следует признать достаточно надежным, так как $\nu_{\text{вар-мах}} = 0,198$ (при $\nu_{\text{вар}} < 0,2$), $W_{\text{кон}} = 0,63$ (при $W_{\text{кон}} > 0,5$), $\alpha_{\text{зн}} = 0,18$ (при $\alpha_{\text{зн}} < 0,2$), $\rho_{\text{кор}} = 1,0$ (при $\rho_{\text{кор}} > 0,8$).

Для подтверждения теоретических исследований, а также приобщения к поиску оптимальной системы энергоснабжения по обобщающему критерию эффективности следует учитывать ранги и весовые коэффициенты показателей, которые являются определяющими функции энергопотребления и эксплуатационных затрат:

$$k_1 = 0,39k_4' + 0,37k_3' + 0,28k_5' + M_{k-z}. \quad (6.9)$$

Полученные данные дают возможность упростить задачу определения оптимальной системы энергоснабжения дождевальная машины. Мнения экспертов и обобщение полученных результатов позволяют определить объективную целевую функцию связи обобщающего критерия эффективности k_1 .

6.3 Обработка результатов производственных испытаний по выбору системы энергоснабжения дождевальных машин

Показателем энергетической эффективности является энергопотребление. Энергопотребление полива для дождевальной машины зависит от продолжительности работы за сезон. В производственных испытаниях для машин зафиксированы энергопотребление насоса водоподдачи и энергопотребление на распределение воды ДМ, питаемых кабельными и воздушными линиями, с помощью счетчиков электроэнергии, установленных на трансформаторных подстанциях. Для ДМ с гидравлическим приводом зафиксировано энергопотребление насоса водоподдачи.

В эксплуатационные затраты ДМ входят обслуживание и ремонт элементов систем энергоснабжения, а также источника питания. Для дождевальных машин с переносным генератором в эксплуатационные затраты входят издержки на его содержание и стоимость топлива, необходимого для работы ДМ в течение всего сезона.

На основе собранных данных энергопотребления и эксплуатационных затрат с учетом условий эксплуатации машин, участвовавших в производственных испытаниях, определен критерий эффективности каждой машины. Согласно выражению (3.85), для каждой машины определены расчетные критерии эффективности с возможными вариантами систем энергоснабжения.

Изменение существующих систем энергоснабжения для 5 из 7 дождевальных машин на оптимальный вариант позволил снизить потребление электроэнергии. В таблице 6.8 для образца № 21 представлены данные потребления электроэнергии ДМ с гидроприводом в 2018 г. и ДМ, эксплуатируемой в тех же условиях, с электроприводом и питающей кабельной линией в 2020 г.

Таблица 6.8 – Сравнение энергопотребления ДМ с существующей и оптимальной системами энергоснабжения образца № 21 производственных испытаний

| Месяц | Продолжительность работы за месяц, ч | Энергопотребление ДМ с гидроприводом (гидроцилиндры) - насос водоподдачи, 2018 г. | Энергопотребление ДМ с электроприводом и кабельной линией, 2020 г. | | Разница, кВт·ч |
|--------|--------------------------------------|---|--|-------------------------|----------------|
| | | | насос водоподдачи, кВт·ч | электропривод ДМ, кВт·ч | |
| Июнь | 68 | 16733 | 13824 | 598 | 2311 |
| Июль | 194 | 47996 | 36852 | 1843 | 9301 |
| Август | 142 | 34459 | 26098 | 1370 | 6991 |

Разница энергопотребления для образца № 21 характеризует повышение энергетической эффективности дождевальными машинами кругового действия при том же качестве полива. Она составляет в среднем 17,8 %.

Сведем в таблицу 6.9 данные производственных испытаний для дождевальных машин, у которых существующая система энергоснабжения не соответствует условиям эксплуатации. Для этих машин изменены системы энергоснабжения на оптимальный вариант и для двух машин получены результаты энергопотребления, а для остальных вариантов спрогнозированы данные энергопотребления.

Таблица 6.9 – Сравнение энергопотребления ДМ с существующей и оптимальной системами энергоснабжения в производственных испытаниях

| Показатель дождевальных машин | Образец ДМ | | | | | |
|--|------------------------------------|--|---|---|---|--|
| | 1 | 4 | 5 | 11 | 16 | 21 |
| Существующая система энергоснабжения | механический привод | гидропривод возвратно-поступательного действия | электропривод с питанием от гидрогенератора | электропривод с питанием от дизельного генератора | электропривод с питанием от дизельного генератора | гидропривод возвратно-поступательного действия |
| Энергопотребление в 2018 г. (200 ч работы ДМ), кВт·ч·10 ² | 664 | 1120 | 1220 | 488 | 399 | 1540 |
| Оптимальная система энергоснабжения | гидропривод вращательного действия | электропривод с питанием от кабельной линии | гидропривод вращательного действия | электропривод с питанием от акб | электропривод с питанием от кабельной линии | электропривод с питанием от кабельной линии |
| Энергопотребление в 2020 г. (прогноз 2021 г.) – 200 ч работы ДМ, кВт·ч·10 ² | (590) | 740 | (1100) | (435) | (360) | 1265 |
| Соответствие исходным условиям эксплуатации | соответствует | соответствует | соответствует | соответствует | соответствует | соответствует |
| Разница энергопотребления, кВт·ч (%) | 7400 (11,15) | 38000 (33,92) | 12000 (9,83) | 5300 (10,86) | 3900 (9,77) | 27500 (17,85) |
| Эксплуатационные затраты, тыс. руб./год (2018/2020 «прогноз 2021») | 504 / «430» | 802 / 526 | 867 / «782» | 364 / «304» | 307 / «253» | 1029 / 885 |
| Критерий эффективности k_1 (экспериментальный) | 120 | 349 | 250 | 348 | 355 | 511 |
| Критерий эффективности k_1 (расчетный) | 121 | 353 | 242 | 353 | 352 | 508 |

Рассчитаем статистические показатели производственных испытаний: среднее значение, дисперсию, среднее квадратичное отклонение и среднюю квадратичную ошибку полученного снижения энергопотребления (ΔW).

Определим среднее значение снижения энергопотребления:

$$\overline{\Delta W} = \frac{\sum \Delta W_i}{n}, \quad (6.10)$$

где n – количество образцов ДМ, ед.

Для оценки степени разброса (отклонения) снижения энергопотребления от его среднего значения вместе с максимальным и минимальным значениями рассчитаем дисперсию и среднее квадратичное отклонение.

Дисперсию определим по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (\overline{\Delta W} - \Delta W_i)^2}{n-1}. \quad (6.11)$$

Среднее квадратичное отклонение (экспериментальное отклонение) снижения энергопотребления:

$$\sigma_э = \sqrt{\sigma^2}. \quad (6.12)$$

Среднюю квадратичную ошибку определим по выражению:

$$\sigma_{ср} = \sqrt{\frac{\sum (\overline{\Delta W} - \Delta W_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (6.13)$$

Оценим достоверность полученных результатов снижения энергопотребления с вероятностью 95 % [99]. На основе количества испытанных образцов и вероятности появления того же снижения энергопотребления при тех же условиях эксплуатации ДМ определим коэффициент Стьюдента α согласно [127]. Тогда доверительный интервал:

$$\Delta W_{дов.} = \pm \alpha \sigma_{ср}. \quad (6.14)$$

При всей совокупности производственных испытаний снижение энергопотребления:

$$\Delta W = \overline{\Delta W} \pm \alpha \sigma. \quad (6.15)$$

Занесем статистические данные в таблицу 6.10.

Таблица 6.10 – Статистические показатели снижения энергопотребления полива дождевальными машинами

| Показатель | Обозначение | Значение |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------|
| Среднее снижение энергопотребления, % | $\overline{\Delta W}$ | 15,56 |
| Среднее квадратичное отклонение, % | σ_0 | 4,55 |
| Ошибка эксперимента, % | σ_{cp} | 2,07 |
| Доверительный интервал, % | ΔW | 10,24...20,87 |

Таким образом, с вероятностью 95 % и средней квадратичной ошибкой 2,07 % установлено снижение энергопотребления полива при эксплуатации ДМ с оптимальными системами энергоснабжения на 10,24–20,87 %.

Сравним полученные данные производственных испытаний и теоретического расчета критерия эффективности систем энергоснабжения дождевальных машин (рисунок 6.5).

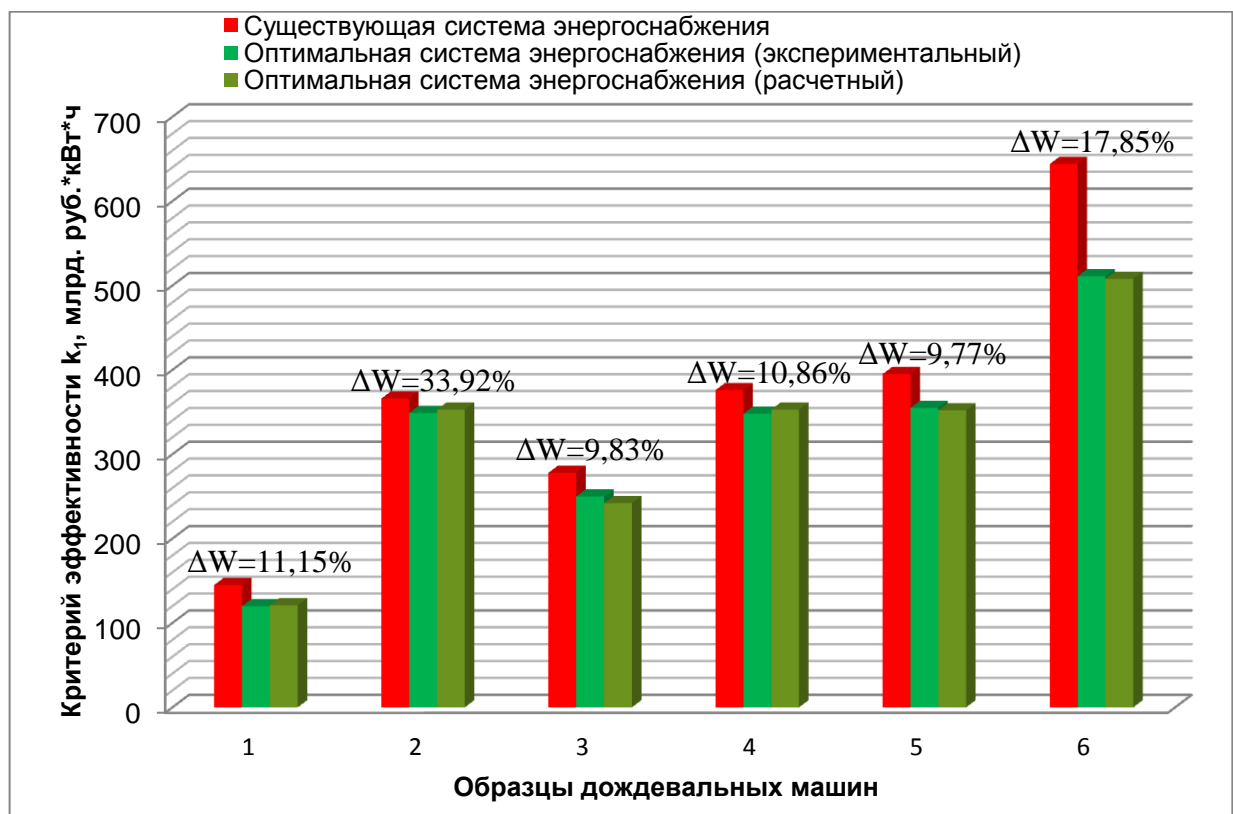


Рисунок 6.5 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных на основе обобщающего критерия эффективности с долей снижения энергопотребления (1 – образец № 1; 2 – образец № 4; 3 – образец № 5; 4 – образец № 11; 5 – образец № 16; 6 – образец № 21)

Отклонение результата теоретического расчета от экспериментальных данных критерия эффективности системы энергоснабжения составляет не более 0,5–3,2 %.

6.4 Производственные испытания дождевальных машин на аккумуляторном питании с использованием возобновляемых источников энергии

В программу производственных испытаний секции дождевальной машины на аккумуляторном питании входили проверка и установление параметров данного источника питания в полевых условиях. В качестве возобновляемого источника энергии была принята солнечная батарея для заряда аккумуляторной батареи.

Испытания проводили в период с 01.03.2019 г. по 01.11.2019 г. на базе предприятий ООО «Мелиоративные машины» (г. Саратов), УНПО «Поволжье» при СГАУ (Энгельсский район Саратовской области), УНПК «Агроцентр» при СГАУ (г. Саратов), на предприятии Agref (г. Комарно, Словакия).

В ходе испытаний сравнивали показатели источников питания системы энергоснабжения от кабельной линии и аккумуляторных батарей. Также проводили проверку работоспособности аккумуляторного источника питания электропривода с электродвигателем переменного тока, подключенного через инверторный преобразователь. Новизна данного способа питания подтверждена патентами на полезную модель [211, 216]. Результаты производственных испытаний также подтверждены актами внедрения (*приложение Г*), а их воплощение подкреплено рисунками 6.6–6.9.



Рисунок 6.6 – Стенд секции дождевальной машины с аккумуляторным питанием и солнечными батареями (СГАУ, г. Саратов)



Рисунок 6.7 – Стенд секции дождевальной машины с аккумуляторным питанием и солнечными батареями (УНПО «Поволжье» СГАУ, г. Саратов)



Рисунок 6.8 – Дождевальная машина с аккумуляторным питанием и солнечными батареями (Агреф, г. Комарно, Словакия)

Дождевальные машины с аккумуляторным питанием и солнечными батареями имеют комплект оборудования, который отличается от комплекта дожде-

вальных машин с источником питания на переменном токе. Выделим особенности в комплектовании таких машин (таблица 6.11).

Таблица 6.11 – Сравнение ДМ одинакового размера с источниками питания от аккумуляторных батарей и переносным генератором

| № п/п | Наименование элемента системы энергоснабжения | ДМ (6 секций) с источником переменного тока | ДМ (6 секций) с источником постоянного тока | Индекс (относительно аккумуляторного источника питания) |
|-------|--|--|---|---|
| 1 | Источник энергии | переносной генератор 12 кВт·А | аккумуляторы 42 шт. (12 В, 55 А·ч) | -0,8 |
| 1.1 | Стоимость электроэнергии | 11,2 руб./кВт·ч | 1,0 руб./кВт·ч | +11,2 |
| 1.2 | Затраты на техническую эксплуатацию источника | 4550 руб./год | 1280 руб./год | +3,7 |
| 1.3 | Источник питания | кабельная линия 4×25 с длиной прокладки до 3840 м / более 3890 м | аккумуляторы 42 шт. (12 В, 55 А·ч) | -/+ |
| 1.4 | Стоимость электроэнергии | 5,51 руб./кВт·ч | 1,0 руб./кВт·ч | +5,5 |
| 1.5 | Затраты на техническую эксплуатацию источника | 550 руб./год | 1280 руб./год | -0,47 |
| 1.6 | Дополнительные элементы | – | солнечная батарея 18 шт. (1550×700, 150 Вт) | – |
| 2 | Электропривод | УМС 380VAC, 1,5 А, $i = 2000$ 550 Вт (22500 руб.) | BM18-20 36-60 VDC, 10 А, $i = 2000$ 360–600 Вт (10200 руб.) | +2,5 |
| 2.1 | Передача энергии электродвигателю | кабель 3×1,5 длиной 8 м | кабель 2×6 длиной 2 м | -0,6 |
| 2.2 | Передача энергии электродвигателю (силовая сеть) | кабель 10×6 длиной 360 м | – | + |
| 2.3 | Дополнительные элементы | токосъемник круговой | – | + |
| 3 | Управление электродвигателем | ПСЛ на концевых выключателях (12000 руб.) | ПСЛ на ультразвуковом приемопередатчике (4500 руб.) | +2,7 |
| 3.1 | Потребление энергии в год, кВт·ч | 1,10 | 0,25 | +4,1 |
| 4 | Масса элементов системы энергоснабжения в составе общей массы ДМ | 388 | 1045 | -2,7 |



Рисунок 6.9 – Дождевальная машина с аккумуляторным питанием и солнечными батареями (УНПК «Агроцентр» СГАУ, г. Саратов)

Таким образом, применение аккумуляторного источника питания сопровождается рядом эффектов: в 5,5–11,2 раза снижается стоимость электроэнергии; в 3,7 раза уменьшаются затраты на техническую эксплуатацию источника питания по сравнению с переносным генератором; исключается прокладка силовой кабельной линии вдоль водораспределительного трубопровода; в 2,5 раза сокращается стоимость электропривода за счет применения более дешевых электродвигателей постоянного тока (или вентильных электродвигателей); в 2,7 раза снижается стоимость устройств управления дождевальной машиной. Отклонение теоретических и экспериментальных данных продолжительности работы ДМ на АКБ, оснащенных солнечными панелями, составляет менее 8 %.

6.5 Производственные испытания дождевальной машины с изменением конструктивных параметров

Изменение диаметра водораспределительного трубопровода

Производственные испытания ДМ с изменением водораспределительного трубопровода проводились на базе предприятия УНПО «Поволжье» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавалова на дождевальной машине МДЭК «Каскад» (серийный номер МДЭК-362-41-43, год выпуска – 2017) для крайней тележки.

Крайняя секция длиной 59,5 м без консольного трубопровода состоит из 5 11,9-метровых труб (диаметром 219 мм с толщиной стенки 3 мм. При данных параметрах трубопровода зафиксированы в пяти опытах значения тока, напряжения и активной мощности (таблица 6.12). Для проверки снижения нагрузки две 11,9-метровые трубы заменены с 219 мм на трубы диаметром 159 мм (коэффициент пропорциональности длин с большим диаметром (219 мм → 159 мм) $a = 60\%$, $\Delta d = 27\%$), при котором расчетное значение изменения нагрузки на электропривод составляет $\Delta P'' = 14,93\%$. В таблице 6.12 зафиксированы также параметры тока, напряжения и активной мощности (рисунок 6.10).

Таблица 6.12 – Результаты испытаний ДМ с изменением диаметра водораспределительного трубопровода

| № опыта | Показания при неизменном диаметре 219 мм | | | Показания при изменении диаметра 219→159 мм ($a = 60\%$ секции 219 мм) | | | $\Delta d, \%$ | Расчетное $\Delta P'', \%$ | Опытное $\Delta P'', \%$ |
|---------|--|----------------|-----------------|---|----------------|-----------------|----------------|----------------------------|--------------------------|
| | I_{L1}, A | U_{L1-L2}, B | $P_{L1-L2}, Bт$ | I_{L1}, A | U_{L1-L2}, B | $P_{L1-L2}, Bт$ | | | |
| 1 | 1,08 | 378 | 244 | 1,01 | 378 | 213 | 27 | 14,93 | 12,70 |
| 2 | 1,12 | 373 | 263 | 1,02 | 379 | 220 | 27 | 14,93 | 16,34 |
| 3 | 1,11 | 373 | 265 | 1,01 | 375 | 207 | 27 | 14,93 | 21,88 |
| 4 | 1,08 | 379 | 242 | 1,03 | 381 | 218 | 27 | 14,93 | 9,91 |
| 5 | 1,09 | 379 | 249 | 1,06 | 378 | 217 | 27 | 14,93 | 12,85 |



Рисунок 6.10 – Фрагмент производственных испытаний изменения диаметра с 219 на 159 мм водораспределительного трубопровода крайней секции

На основе данных производственных испытаний получены результаты, позволяющие сравнить с данными теоретических исследований (рисунок 6.11).

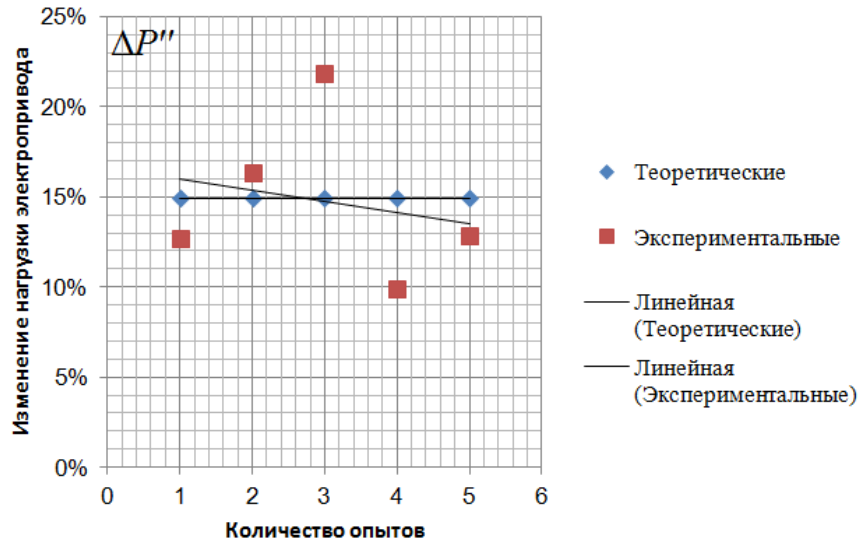


Рисунок 6.11 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных изменения нагрузки электропривода при изменении диаметра трубопровода с 219 на 159 мм ($a = 60\%$, $\Delta d = 27\%$)

Таким образом, при изменении диаметра водораспределительного трубопровода секции наблюдается изменение нагрузки электропривода с оценкой доверительного интервала 2,2 [127], вероятностью 95 % и средней квадратической ошибкой 1,18 % на 9,9...21,9 %. Отклонение среднего экспериментального значения от теоретических данных составляет не более 6 %.

Изменение ширины и радиуса колес опорной тележки

Производственные испытания по изменению параметров колес на пневматических шинах (ширина и радиус) проводили на том же предприятии и той же дождевальном машине кругового действия (серийный номер МДЭК-362-41-43, год выпуска – 2017).

Испытания проводили на крайней опорной тележке для электропривода с электродвигателем марки УМС 3.5 (рисунок 6.12) с колесами на пневматических шинах с параметрами, приведенными в таблице 6.13.



Рисунок 6.12 – Паспортные данные электродвигателя с редуктором, используемые на испытуемой дождевальной машине

При данных испытаниях фиксировались показания силы тока, приложенного напряжения и потребляемой активной мощности в пяти опытах. Заменяя (рисунок 6.13) оба колеса другого размера, данные которого указаны в таблице 6.13, при неизменных массе и параметрах грунта, также фиксировали показания потребляемых тока, активной мощности и приложенного напряжения.



Рисунок 6.13 – Фрагмент производственных испытаний по изменению колес опорной тележки

Таблица 6.13 – Результаты испытаний ДМ с изменением параметров колес опорной тележки

| № опыта | Показания при колесах с пневматическими шинами: 16,5/70-18, статический радиус 484±5, ширина профиля 425 мм, давление в шине 0,17 МПа | | | Показания при колесах с пневматическими шинами: 15,5/65-18, статический радиус 450±5 мм, ширина профиля 395 мм, давление в шине 0,17 МПа | | | Расчетное $\Delta P'''$, % | Опытное $\Delta P'''$, % |
|---------|---|-----------------|------------------|--|-----------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | I_{L1} , А | U_{L1-L2} , В | P_{L1-L2} , Вт | I_{L1} , А | U_{L1-L2} , В | P_{L1-L2} , Вт | | |
| 1 | 1,12 | 380 | 276 | 1,11 | 380 | 263 | 6,66 | 4,71 |
| 2 | 1,13 | 381 | 282 | 1,10 | 382 | 251 | 6,66 | 10,99 |
| 3 | 1,12 | 378 | 266 | 1,10 | 380 | 260 | 6,66 | 2,25 |
| 4 | 1,07 | 379 | 262 | 1,09 | 377 | 250 | 6,66 | 4,58 |
| 5 | 1,10 | 378 | 271 | 1,08 | 379 | 252 | 6,66 | 7,01 |

На основе данных производственных испытаний получены результаты, позволяющие сравнить их с данными теоретических исследований (рисунок 6.14).

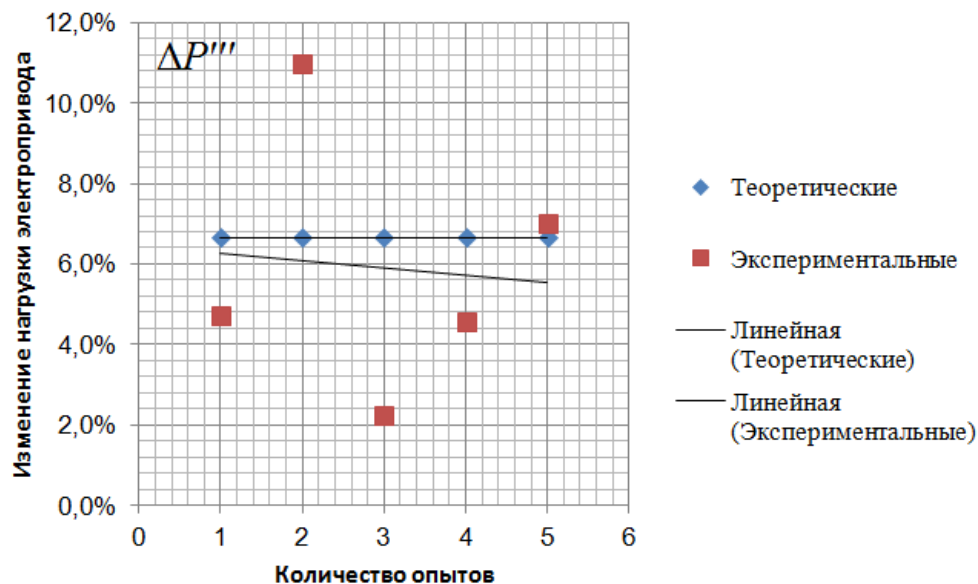


Рисунок 6.14 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных изменения нагрузки электропривода при изменении параметров колес (изменение радиуса с 484 на 450 мм, ширины с 425 на 395 мм)

Таким образом, при изменении параметров колес опорной тележки секции дождевальная машина наблюдается изменение нагрузки электропривода с оценкой доверительного интервала 2,34 [127], вероятностью 95 % и средней квадратичной ошибкой 1,79 % на 2,3–10,9 %. Отклонение среднего экспериментального значения от теоретических данных расчета составляет не более 11 %.

6.6 Технико-экономическая оценка результатов внедрения

6.6.1 Оценка экономической эффективности применения энергоэффективной системы эксплуатации дождевальная машины кругового действия

Оценим экономическую эффективность применения энергоэффективной системы для дождевальной машины, которая в базовом варианте имеет систему энергоснабжения на гидроприводе (№ 4 – см. таблицу 6.1), а в новом варианте энергоэффективная система имеет электропривод. При этом в базовом варианте насосом водоподдачи требуется создавать высокое давление до 0,7 МПа, мощность которого составляет 315 кВт (подача 550 м³/ч), чтобы осуществлялась работа гидроцилиндров.

Для нового энергоэффективного варианта требуется поменять привод опорных тележек, заменить дождеобразующие насадки и поменять насос водоподдачи на насос мощностью 160 кВт (с подачей 500 м³/ч), т. к. необходимое и достаточное давление составляет 0,25...0,4 МПа.

Замена гидропривода на электропривод состоит в приобретении колес на пневматических шинах, колесных редукторов, электродвигателей, валов, крепежа и устройств управления:

$$K_{ЭП} = nk_{\text{мон}}(2C_{\text{кол}} + 2C_{\text{к.ред}} + C_{\text{Эд}} + 2C_{\text{вал}} + 2C_{\text{креп}} + C_{\text{Псл}}), \quad (6.16)$$

где n – количество секций ДМ; $k_{\text{мон}}$ – коэффициент, учитывающий стоимость монтажа электропривода ($k_{\text{мон}} = 1,10...1,15$ при 10–15 % стоимости монтажа относительно стоимости оборудования); $C_{\text{кол}}$ – стоимость колеса на пневматической шине, руб.; $C_{\text{к.ред}}$ – стоимость колесного редуктора, руб.; $C_{\text{Эд}}$ – стоимость электродвигателя типа УМС 3.5 (мотор-редуктора), руб.; $C_{\text{вал}}$ – стоимость вала передачи механической энергии, руб.; $C_{\text{креп}}$ – стоимость крепления (комплекта крепежа), руб.; $C_{\text{Псл}}$ – стоимость прибора синхронизации движения в линию, руб. [231, 233, 242, 300].

Сведем в таблицу 6.14 рыночные стоимости оборудования (данные 2020 г.) [231, 233, 242, 300].

Таблица 6.14 – Рыночная стоимость оборудования электропривода ДМ

| № п/п | Наименование оборудования, маркировка | Стоимость, руб. |
|-------|---|-----------------|
| 1 | Колесо на пневматической шине, Nortec H-05 136 A6 18.4-24 | 20 850 |
| 2 | Колесный редуктор, ИСП-150GB | 14 233 |
| 3 | Электродвигатель (мотор-редуктор), УМС 3.5 | 20 580 |
| 4 | Вал, 40×40×1340 | 550 |
| 5 | Комплект крепежа | 500 |
| 6 | Прибор синхронизации движения в линию (ПСЛ) | 14 565 |

Стоимость замены гидропривода на электропривод:

$$K_{ЭП} = 10 \cdot 1,1 \cdot (2 \cdot 20850 + 2 \cdot 14233 + 20580 + 2 \cdot 550 + 2 \cdot 500 + 14565) = 1181521 \text{ руб.}$$

Капиталовложения в дизельный генератор:

$$K_{ДГ} = C_{ДГ} + C_{дДГ}, \quad (6.17)$$

где $C_{ДГ}$ и $C_{дДГ}$ – стоимость дизельного генератора (принимается по данным завода-изготовителя [242], для дизель-генератора АД-10-Т400 мощностью 10 кВт·А ($C_{ДГ} = 241300$ руб.) и его доставки на место установки, руб.

Стоимость доставки дизельного генератора определяют относительно его стоимости [300]:

$$C_{дДГ} = (0,05 \dots 0,07) C_{ДГ}; \quad (6.18)$$

$$K_{ДГ} = 241300 + 0,05 \cdot 241300 = 253365 \text{ руб.}$$

Замена насоса водоподдачи:

$$K_{нас} = C_{аг} + M_{аг}, \quad (6.19)$$

где $C_{аг}$ – стоимость насосного агрегата (агрегат 1Д500-63 $C_{аг} = 398303$ руб. [231, 242]), руб.; $M_{аг}$ – стоимость монтажа насосного агрегата (10–15 % от стоимости), руб.

$$K_{нас} = 398303 + 0,1 \cdot 398303 = 438134 \text{ руб.}$$

Суммарные капиталовложения в новый энергоэффективный вариант:

$$K_{ЭЭФ} = K_{ЭП} + K_{ЭГ} + K_{нас} = 1181521 + 253365 + 438134 = 1873020 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты складываются из затрат на обслуживание и стоимость ресурса. Затраты на обслуживание электропривода определяются по

трудоемкости работ ТО и ТР, а также ущербом из-за отказов оборудования. Примем, что для сравниваемых вариантов затраты на обслуживание оборудования будут одинаковыми.

Затраты на ресурс базового и нового вариантов будут существенно различаться. Разница эксплуатационных затрат будет составлять экономическую эффективность применения новой системы энергоснабжения.

Рассчитаем показатели экономической эффективности: годовой экономический эффект, срок окупаемости, чистый дисконтированный доход и индекс доходности.

Годовой экономический эффект определим для минимального и максимального сроков эксплуатации ДМ с минимальными и максимальными ценами на ресурс (электроэнергию и дизельное топливо):

$$\mathcal{E}_{\min} = \mathcal{C}_{\mathcal{E}\mathcal{E}\min} t_{\min} P_{\text{нас-баз}} - (\mathcal{C}_{\mathcal{E}\mathcal{E}\min} t_{\min} P_{\text{нас-нов}} + \mathcal{C}_{\mathcal{D}\mathcal{T}\min} n_{\text{ч}} t_{\min}), \quad (6.20)$$

$$\mathcal{E}_{\max} = \mathcal{C}_{\mathcal{E}\mathcal{E}\max} t_{\max} P_{\text{нас-баз}} - (\mathcal{C}_{\mathcal{E}\mathcal{E}\max} t_{\max} P_{\text{нас-нов}} + \mathcal{C}_{\mathcal{D}\mathcal{T}\max} n_{\text{ч}} t_{\max}), \quad (6.21)$$

где $\mathcal{C}_{\mathcal{E}\mathcal{E}\min}$, $\mathcal{C}_{\mathcal{E}\mathcal{E}\max}$ – минимальная и максимальная цена на электроэнергию, руб./кВт·ч; t_{\min} , t_{\max} – минимальная и максимальная продолжительность работы ДМ за сезон, ч; $P_{\text{нас-баз}}$, $P_{\text{нас-нов}}$ – мощность электродвигателей насосов базового и нового вариантов, кВт; $\mathcal{C}_{\mathcal{D}\mathcal{T}\min}$, $\mathcal{C}_{\mathcal{D}\mathcal{T}\max}$ – минимальная и максимальная цена на дизельное топливо, руб./л; $n_{\text{ч}}$ – средняя норма потребления дизельного топлива за 1 ч работы дизельного генератора (для АД-10-Т400 $n_{\text{ч}} = 2,6$ л/ч);

$$\mathcal{E}_{\min} = 5,05 \cdot 300 \cdot 315 - (5,05 \cdot 300 \cdot 160 + 41,35 \cdot 2,6 \cdot 300) = 202572 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 7,71 \cdot 1000 \cdot 315 - (7,71 \cdot 1000 \cdot 160 + 48,55 \cdot 2,6 \cdot 1000) = 1068820 \text{ руб.}$$

Определим минимальный и максимальный сроки окупаемости:

$$T_{\text{OKmin}} = \frac{K_{\mathcal{E}\mathcal{E}\Phi}}{\mathcal{E}_{\max}}; \quad (6.22)$$

$$T_{\text{OKmax}} = \frac{K_{\mathcal{E}\mathcal{E}\Phi}}{\mathcal{E}_{\min}}; \quad (6.23)$$

$$T_{\text{OKmin}} = 1873020 / 1068820 = 1,75 \text{ года};$$

$$T_{\text{OKmax}} = 1873020 / 202572 = 9,24 \text{ года.}$$

Рассчитаем чистый дисконтированный доход и индекс доходности капиталовложений в новый вариант системы энергоснабжения. В качестве параметров

прогноза примем продолжительность работы ДМ за сезон, стоимость электроэнергии и дизельного топлива.

Примем за основу данные предыдущих лет (таблица 6.15) продолжительности работы ДМ за сезон и определим коэффициент роста стоимости электроэнергии и дизельного топлива.

Таблица 6.15 – Данные предыдущих лет продолжительности работы ДМ за сезон (образец № 4 таблицы 6.1)

| Показатель | 2010 г. | 2012 г. | 2013 г. | 2014 г. | 2015 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Продолжительность работы ДМ за сезон, ч | 1035 | 355 | 898 | 807 | 798 | 955 | 882 | 655 |
| Стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч | 4,71 | 5,05 | 5,25 | 5,31 | 5,33 | 5,51 | 5,51 | 5,78 |
| Стоимость дизельного топлива, руб./л | 22,31 | 28,55 | 32,05 | 33,55 | 34,77 | 36,30 | 38,50 | 41,35 |

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) капиталовложений в энергоэффективную систему энергоснабжения:

$$\text{ЧДД}_i = \frac{\sum_0^T K_{\text{ЭЭФ}i}}{(1+E)^t} - \frac{\sum_1^T \text{Э}_{\Gamma i}}{(1+E)^t}, \quad (6.24)$$

где $K_{\text{ЭЭФ}i}$ – капиталовложения в энергоэффективную систему энергоснабжения, руб.; $\text{Э}_{\Gamma i}$ – годовая экономия эксплуатационных затрат, руб.; E – норма дисконта или коэффициент реновационных отчислений, $E = 0,15$ [242, 300]; T – горизонт расчета, лет; t – номер шага расчета по годам, начиная с момента эксплуатации нового источника питания.

Индекс доходности ИД согласно [242, 300]:

$$\text{ИД}_i = \frac{\text{ЧДД}_i}{\sum_0^T K_{\text{ЭЭФ}i}}. \quad (6.25)$$

Результаты расчета ЧДД и ИД приведены в таблице 6.16.

**Таблица 6.16 – Результаты расчета чистого дисконтированного дохода
и индекса доходности капиталовложений
в энергоэффективную систему**

| Показатель | Горизонт расчета, лет | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Дополнительные капиталовложения, тыс. руб. | 1873,0 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Продолжительность работы за сезон, ч | – | 1035 | 355 | 898 | 807 | 798 | 955 | 882 | 655 |
| Стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч | – | 5,55 | 5,75 | 5,95 | 6,15 | 6,35 | 6,55 | 6,75 | 6,95 |
| Стоимость дизельного топлива, руб./л | – | 39,0 | 40,0 | 41,0 | 42,0 | 43,0 | 44,0 | 45,0 | 46,0 |
| Годовая экономия, тыс. руб. | 0 | 785,4 | 279,5 | 732,4 | 681,1 | 696,2 | 860,3 | 819,6 | 627,3 |
| Дисконтный множитель | 1 | 0,87 | 0,756 | 0,658 | 0,572 | 0,497 | 0,432 | 0,376 | 0,327 |
| Приведенная разность, тыс. руб. | –1873,0 | 683,3 | 211,3 | 481,9 | 389,6 | 346,0 | 371,6 | 308,2 | 205,1 |
| Чистый дисконтированный доход, тыс. руб. | 1124,1 | | | | | | | | |
| Индекс доходности, руб./руб. | 0,60 | | | | | | | | |

Экономическая эффективность применения энергоэффективной системы энергоснабжения дождевальной машины существенно зависит от продолжительности работы машины за сезон, цен на электроэнергию, дизельное топливо. При минимальных ценах на энергетические ресурсы и продолжительности работы ДМ за сезон годовой экономический эффект составит 202,5 тыс. руб., а срок окупаемости капиталовложений замены гидропривода на электропривод с переносным дизельным генератором – 9,24 года. Если же цены на ресурс будут приведены в максимальном значении, а продолжительность работы машины за сезон составит около 1000 ч, то годовой экономический эффект составит 1068,8 тыс. руб., а срок окупаемости – 1,75 года (таблица 6.17).

Чистый дисконтированный доход, прогнозируемый на 8 лет, с учетом случайности времени работы ДМ по годам и роста цен на энергетические ресурсы (электроэнергия, дизельное топливо) составит около 1124,1 тыс. руб. Индекс доходности в пределах $0,5 < ИД < 1,0$ свидетельствует о рентабельности капиталовложений в энергоэффективную систему энергоснабжения испытываемой дождевальной машины образца № 4 (см. таблицу 6.1).

Таблица 6.17 – Показатели экономической эффективности энергоэффективной системы энергоснабжения дождевальной машины кругового действия

| № п/п | Показатель | Значение |
|-------|---|----------------|
| 1 | Капиталовложения в энергоэффективную систему (замена гидропривода на электропривод с переносным генератором), тыс. руб. | 1873,0 |
| 2 | Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб. | 32,2...126,2 |
| 3 | Годовой экономический эффект, тыс. руб. | 202,5...1068,8 |
| 4 | Срок окупаемости капиталовложений, лет | 1,75...9,24 |
| 5 | Прогнозируемый чистый дисконтированный доход, тыс. руб. | 1124,1 |
| 6 | Прогнозируемый индекс доходности, руб./руб. | 0,60 |

Таким образом, применение энергоэффективной системы эксплуатации дождевальных машин в условиях Саратовской области позволит для 10–30 % дождевальных машин использовать эффективную систему энергоснабжения с ожидаемой годовой экономией 10,54–28,92 млн руб.

6.6.2 Технико-экономическая оценка внедрения аккумуляторного источника питания с использованием солнечных батарей

Выполним технико-экономическую оценку различных источников питания электрифицированной дождевальной машины:

- кабельная линия 0,4 кВ;
- переносной дизельный генератор переменного тока;
- аккумуляторный источник питания с зарядом от солнечных батарей.

Рассмотрим применение данных источников по исходным данным дождевальной машины «Каскад», установленной на территории пахотных земель предприятия УНПО «Поволжье» СГАУ (Энгельский район Саратовской области) со следующими исходными данными: расстояние от водоема – 1000 м; расстояние от централизованной энергосистемы п. Степное – 3000 м; входное давление жидкости в трубопроводе ДМ – 0,35 МПа; поливаемая культура – кормовая кукуруза; оросительная норма – 4000 м³/га; поливная площадь – 48 га; количество секций длиной 65 м – 6 шт.; электропривод с электродвигателем мощностью 570 Вт (переменного или постоянного тока) опорной тележки секции; общая установленная мощность ДМ с учетом автоматических устройств управления – 5,5 кВт (7 кВ·А).

Примем, что при различных вышеуказанных источниках стоимость конструктивных элементов и оборудования дождевальная машины не изменится. Рассчитаем показатели капиталовложений, удельных эксплуатационных затрат и эффективности сравниваемых вариантов.

Капиталовложения в источник электроэнергии:

$$K_{\text{кл}} = C_{\text{кл}} + C_{\text{Мкл}}; \quad (6.26)$$

$$K_{\text{ДГ}} = C_{\text{ДГ}} + C_{\text{дДГ}}; \quad (6.27)$$

$$K_{\text{акб}} = C_{\text{акб}} + C_{\text{сб}} + C_{\text{М}}, \quad (6.28)$$

где $K_{\text{кл}}$, $K_{\text{ДГ}}$, $K_{\text{акб}}$ – соответственно общие капиталовложения в кабельную линию, дизельный генератор и аккумуляторные батареи, руб.; $C_{\text{кл}}$, $C_{\text{Мкл}}$ – соответственно стоимость кабельной линии и ее монтажа, руб.; $C_{\text{ДГ}}$ и $C_{\text{дДГ}}$ – стоимость дизельного генератора (принимается по данным завода-изготовителя [242, 300], для дизель-генератора мощностью 10 кВт·А $C_{\text{ДГ}} = 241300$ руб.) и его доставки на место установки, руб.; $C_{\text{акб}}$, $C_{\text{сб}}$, $C_{\text{М}}$ – соответственно стоимость аккумуляторной батареи, солнечной батареи и монтажа, руб.

$$C_{\text{кл}} = (c_{\text{кл}} + c_{\text{гф}}) l_{\text{нп}}, \quad (6.29)$$

где $c_{\text{кл}}$ – стоимость 1 м кабеля, руб., для данной нагрузки 5,5 кВт с учетом потерь в линии принимаем по длительно допустимому току кабель АВВГ 4×16 мм² [242, 300] стоимостью 68,35 руб./м с учетом цен на 01.2020 г.; $c_{\text{гф}}$ – стоимость 1 м гофрированной гибкой трубы, $c_{\text{гф}} = 12,14$ руб./м [300]; $l_{\text{нп}}$ – удаленность от потребительской трансформаторной подстанции, м, $l_{\text{нп}} = 3000$ м.

$$C_{\text{Мкл}} = c_{\text{МП}} l_{\text{нп}}, \quad (6.30)$$

$c_{\text{МП}}$ – удельная стоимость механизированной прокладки кабеля в траншее по данным [242, 300], руб./м, $c_{\text{МП}} = 64$ руб./м с учетом цен 2020 г.

Стоимость аккумуляторной батареи:

$$C_{\text{акб}} = N_{\text{акб}} c_{\text{акб}}, \quad (6.31)$$

где $N_{\text{акб}}$ – необходимое количество ТАБ, шт. (согласно нашей методике выбора, для 6 секций требуется 42 шт.); $c_{\text{акб}}$ – стоимость одной тяговой аккумуляторной

батареи 12 В 65 А·ч, руб., по данным завода-изготовителя [300], $c_{акб} = 6280$ руб. с учетом цен 2020 г.

Стоимость солнечной батареи $C_{сб}$ определяют по удельной стоимости y_s 1 м² площади солнечного элемента, по рыночным ценам 01.2020 г. $y_s = 7215...10195$ руб./м² [1, 12, 300]:

$$C_{сб} = y_s S_{сб}, \quad (6.32)$$

где $S_{сб}$ – требуемая площадь солнечной батареи для всех секций дождевальнoй машины, м².

Для южных районов Саратовской области в летний период при безоблачном небе с вероятностью $M(t) = 0,9$ для монокристаллических солнечных элементов [12, 300] с 1 м² можно получить электроэнергии $s_{сб1поли} = 144...192$ Вт·ч. Тогда при условии достаточной подзарядки энергией от солнечных батарей 20 % от энергии аккумуляторных батарей получим значение общей площади солнечных элементов:

$$S_{сб} = \frac{0,2k_b W_{акб}}{k_{нр} s_{сб1поли}} = \frac{0,2k_b N_{акб} E_1 C_{N1} (1-k_q)}{k_{нр} s_{сб1поли}}, \quad (6.33)$$

где k_b – эквивалентный коэффициент восстановления заряда ТАБ, $k_b = 1,3$ [35, 114]; E_1 – напряжение одной ТАБ, В; C_{N1} – емкость одной ТАБ, А·ч; k_q – допустимый коэффициент разряда емкости АКБ от номинальной, $k_q = 0,3$ [337, 338]; $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность разряда ТАБ по всем секциям при выполнении полива, $k_{нр} = 1,8$ [14, 16, 337, 338].

Согласно [12, 249], стоимость монтажа C_M :

$$C_M = (0,2...0,4)(C_{акб} + C_{сб}). \quad (6.34)$$

На основе данных рыночных цен и стоимостных показателей строительно-монтажных работ сведем все расчеты по капиталовложениям рассматриваемых источников в таблицу 6.18.

Эксплуатационные затраты для представленных вариантов питания электропривода будут суммой затрат (руб.) на ресурс I_{pi} , на заработную плату обслуживающего персонала $I_{зпi}$, на материалы и запасные части I_{mi} , на производственные и организационные нужды I_{oi} , амортизационных отчислений A_{oi} и риска появления ущерба R_i из-за отказов или аварий при выполнении полива:

$$z_i = I_{pi} + I_{зпi} + I_{mi} + I_{oi} + A_{oi} + R_i. \quad (6.35)$$

Таблица 6.18 – Оценка капиталовложений в различные виды источников энергии СЭ

| № п/п | Наименование статьи капиталовложений | Ед. измер. | Цена, руб. | Количество | Стоимость, руб. |
|--|--|----------------|------------|------------|-----------------|
| <i>Кабельная линия</i> | | | | | |
| 1 | Кабель АВВГ 4×16 | м | 68,35 | 3000 | 205050 |
| 2 | Гофрированная труба ПНД-32 | м | 12,14 | 3000 | 36420 |
| 3 | Прокладка кабеля в траншее | м | 64,00 | 3000 | 192000 |
| Итого | | | | | 433470 |
| <i>Переносной дизель-генератор</i> | | | | | |
| 1 | Дизель-генератор мощностью 10 кВт А АД-10-Т400 | шт. | 241300 | 1 | 241300 |
| 2 | Доставка АД-10-Т400 | шт. | 24130 | 1 | 24130 |
| Итого | | | | | 265430 |
| <i>Аккумуляторы с зарядом от солнечных батарей</i> | | | | | |
| 1 | Гелевые тяговые аккумуляторы Delta-12-65 | шт. | 6280 | 42 | 263760 |
| 2 | Солнечные батареи Solar 200 | м ² | 7330 | 23 | 168590 |
| 3 | Доставка и установка ТАБ и СБ | компл. | 129705 | 1 | 129705 |
| Итого | | | | | 562055 |

Эксплуатационные затраты принято учитывать за один год, т. е. составляющие этих затрат принимаются в руб./год.

Годовые эксплуатационные затраты на кабельную линию по ценам 2020 г.:

$$Z_{\text{кл}} = I_{\text{ркл}} + I_{\text{эпкл}} + I_{\text{мкл}} + I_{\text{окл}} + A_{\text{oi}} + R_{\text{кл}}. \quad (6.36)$$

Затраты на ресурс $I_{\text{ркл}}$ для кабельной линии будут определяться по количеству потребленной электроэнергии:

$$I_{\text{ркл}} = (\bar{P}_{\text{н}} + \bar{P}_{\text{дм}}) t_{\text{сез}} \cdot \text{ц}_{\text{ЭЭ}}, \quad (6.37)$$

где $\bar{P}_{\text{н}}$ – средняя потребляемая мощность насоса водоподачи, кВт (принимаем во всех трех вариантах потребляемую мощность насоса одинаковой и равной 75 кВт); $\bar{P}_{\text{дм}}$ – средняя потребляемая мощность дождевальная машины, кВт, для рассматриваемой машины из 6 секций [27] $\bar{P}_{\text{дм}} = 2,1$ кВт; $t_{\text{сез}}$ – продолжительность работы ДМ за сезон, ч (зависит от влажности воздуха и количества осадков за сезон), $t_{\text{сезmin}} = 205$ ч, $t_{\text{сезmax}} = 1252$ ч [256, 257]; $\text{ц}_{\text{ЭЭ}}$ – цена на электроэнергию, руб./кВт·ч, $\text{ц}_{\text{ЭЭ}} = 5,51$ руб./кВт·ч [300].

$$I_{\text{рклmin}} = (75+2,1) \cdot 205 \cdot 5,51 = 87088,30 \text{ руб.}; \quad (6.38)$$

$$I_{\text{рклmax}} = (75+2,1) \cdot 1252 \cdot 5,51 = 531875,89 \text{ руб.} \quad (6.39)$$

Затраты на заработную плату обслуживающего персонала определяют по трудоемкости работ технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) кабельной линии. Трудоемкость работ ТО и ТР принимают в соответствии с нормативной трудоемкостью $T_{\text{ТОкл}}$ и $T_{\text{ТРкл}}$ согласно [300]:

$$I_{\text{зпкл}} = (T_{\text{ТОкл}} + T_{\text{ТРкл}}) l_{\text{нп}} \tau_{\text{Э}}, \quad (6.40)$$

где $T_{\text{ТОкл}}$ и $T_{\text{ТРкл}}$ – удельная нормативная трудоемкость соответственно ТО и ТР кабельной линии, чел.-ч/км, по данным [118] $T_{\text{ТОкл}} = 1,2$ чел.-ч/км; $T_{\text{ТРкл}} = 18$ чел.-ч/км; $\tau_{\text{Э}}$ – часовая тарифная ставка электротехнического оперативно-ремонтного персонала [119, 242, 300], руб./ч, $\tau_{\text{Э}} = 128,50$ руб./ч.

Текущий ремонт кабельной линии, проложенной в траншее, проводят в плановом порядке 1 раз в 36 мес. [118]. Тогда с учетом приведения трудоемкости ТР к одному году затраты на заработную плату:

$$I_{\text{зпкл}} = (1,2 + 6) \cdot 3 \cdot 128,5 = 2775,6 \text{ руб.} \quad (6.41)$$

Затраты на материалы согласно [118, 300]:

$$I_{\text{мкл}} = 0,3 \dots 0,5 I_{\text{зпкл}}; \quad (6.42)$$

$$I_{\text{мкл}} = 0,4 \cdot 2775,6 = 1110,24 \text{ руб.} \quad (6.43)$$

Затраты на производственные и организационные нужды для кабельного источника питания складываются из затрат на горюче-смазочные материалы (ГСМ), топливо для автомобиля, на котором передвигается обслуживающий персонал, и издержек времени на доставку персонала в прямом и обратном направлениях:

$$I_{\text{окл}} = (2l_{\text{нп}}c_{1\text{км}} + t_{\text{и}}\tau_{\text{Э}})n_{\text{ТОкл}}n_{\text{ТРкл}}, \quad (6.44)$$

где $c_{1\text{км}}$ – стоимость ГСМ и топлива на 1 км пути, руб., $c_{1\text{км}} = 4,55$ руб./км; $t_{\text{и}}$ – продолжительность доставки персонала на место выполнения работ и обратно, $t_{\text{и}} = 1$ ч; $n_{\text{ТОкл}}$ – количество ТО за сезон; $n_{\text{ТРкл}}$ – количество ТР за сезон.

$$I_{\text{окл}} = (2 \cdot 3 \cdot 4,55 + 1 \cdot 128,50) \cdot 3 \cdot 1 = 467,40 \text{ руб.} \quad (6.45)$$

Амортизационные отчисления зависят от стоимости кабельной линии. Определим эти отчисления согласно [300] по выражению:

$$A_{\text{окл}} = a_0 K_{\text{кл}}, \quad (6.46)$$

где a_0 – норма амортизационных отчислений на источник энергии ДМ, $a_0 = 4\%$.

$$A_{\text{окл}} = 0,04 \cdot 433470 = 17338,8 \text{ руб.} \quad (6.47)$$

Риск появления ущерба из-за отказа или аварии рассматриваемого источника определяется согласно [118, 229] и является случайной величиной. Если отказ или авария на кабельной линии происходит в момент выполнения полива, то риск будет складываться из технологического ущерба Y_T и ущерба на ремонт Y_P , который заключается в оперативном устранении аварии или отказа. Если же авария происходит в момент, когда ДМ не используется, то риск будет определяться только по ремонтному ущербу Y_P . Максимально возможный риск отказа кабельной линии:

$$R_{\text{кл}} = Q_0(t_{\text{сез}})(Y_T + Y_{P_{\text{кл}}}), \quad (6.48)$$

где $Q_0(t_{\text{сез}})$ – вероятность отказа кабельной линии при сезонном использовании ДМ, $Q_0(t_{\text{сез}}) = 0,01$ [118].

Технологический ущерб согласно [118, 300]:

$$Y_T = 1,13(t_{\text{ф}} - t_{\text{д}})\alpha\Delta\Pi Z, \quad (6.49)$$

где Z – приведенные затраты на полив культуры, руб./т·га:

$$Z = \frac{K_{\text{ДМ}} + z}{(t_{\text{ср}} - t_i)S\Delta\Pi}, \quad (6.50)$$

где $K_{\text{ДМ}}$ – капиталовложения в ДМ, руб.; z – общие эксплуатационные затраты за весь срок эксплуатации, руб.; $t_{\text{ф}}$, $t_{\text{д}}$ – фактическая и допустимая продолжительность простоя, ч; α – доля потерь за 1 ч простоя, ч⁻¹, $\alpha \approx 0,2 \dots 1,0$ ч⁻¹; $\Delta\Pi$ – предполагаемый среднесуточный прирост урожая в натуральных единицах от полива, т, для кормовой кукурузы $\Delta\Pi = 80 \text{ кг} = 0,08 \text{ т}$ в 1 сут. с 1 га [9, 260]; S – площадь поливного участка, га; $t_{\text{ср}}$ – срок службы ДМ, ч; t_i – продолжительность эксплуатации до момента появления аварии, ч.

Принимая для всех видов источника $Z = 3000$ руб./т·га, а разницу фактической и допустимой продолжительности простоя равную 1 ч (так как в течение 1 ч возможно устранить аварию), технологический ущерб во всех случаях будет иметь следующее значение:

$$Y_T = 1,1 \cdot 3000 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,08 \cdot 48 = 12672 \text{ руб.} \quad (6.51)$$

Ущерб на ремонт согласно [109, 118]:

$$U_{\text{Ркл}} = 0,5(I_{\text{зпкл}} + I_{\text{мкл}}); \quad (6.52)$$

$$U_{\text{Ркл}} = 0,5 \cdot (2775,6 + 1110,24) = 1942,92 \text{ руб.} \quad (6.53)$$

Риск появления ущерба при использовании кабельной линии:

$$R_{\text{кл}} = 0,01 \cdot (12672 + 1942,92) = 146,15 \text{ руб.} \quad (6.54)$$

Годовые эксплуатационные затраты на кабельную линию:

$$z_{\text{клmin}} = 87088,3 + 2775,6 + 1110,24 + 467,4 + 17338,8 + 146,15 = 108926,5 \text{ руб.}; \quad (6.55)$$

$$z_{\text{клmax}} = 531875,89 + 2775,6 + 1110,24 + 467,40 + 17338,8 + 146,15 = 553714,08 \text{ руб.} \quad (6.56)$$

Аналогичным образом рассчитаем годовые эксплуатационные затраты для дизельного переносного генератора:

$$z_{\text{дг}} = I_{\text{рдг}} + I_{\text{зпдг}} + I_{\text{мдг}} + I_{\text{одг}} + A_{\text{одг}} + R_{\text{дг}}. \quad (6.57)$$

Затраты на ресурс $I_{\text{ркл}}$ для дизельного генератора будут определяться по количеству потребленного дизельного топлива:

$$I_{\text{рдг}} = \bar{P}_n t_{\text{сез}} c_{\text{дг}} + \bar{c}_T t_{\text{сез}} c_{\text{дг}}, \quad (6.58)$$

где \bar{c}_T – средний расход топлива переносного дизельного генератора, л/ч, для рассматриваемого генератора [231] $\bar{c}_T = 1,6$ л/ч; $c_{\text{дг}}$ – рыночная цена дизельного топлива, руб./л, $c_{\text{дг}} = 42,53$ руб./л [242, 300].

$$I_{\text{рдгmin}} = 75 \cdot 205 \cdot 5,51 + 1,6 \cdot 205 \cdot 42,53 = 98666,09 \text{ руб.}; \quad (6.59)$$

$$I_{\text{рдгmax}} = 75 \cdot 1252 \cdot 5,51 + 1,6 \cdot 1252 \cdot 42,53 = 602585,09 \text{ руб.} \quad (6.60)$$

Затраты на заработную плату обслуживающего персонала определяются по трудоемкости ТО и ТР дизельного генератора. Ее принимают в соответствии с инструкцией по эксплуатации, согласно [231, 242, 300]:

$$I_{\text{зпдг}} = (T_{\text{ТОдг}} + T_{\text{ТРдг}}) \tau_{\text{эм}}, \quad (6.61)$$

где $T_{\text{ТОдг}}$ и $T_{\text{ТРдг}}$ – удельная нормативная трудоемкость ТО и ТР дизельного генератора, чел.-ч, по данным [231] разовое $T_{\text{ТОдг1}} = 1,2$ чел.-ч, $T_{\text{ТРдг}} = 12,5$ чел.-ч; $\tau_{\text{эм}}$ – часовая тарифная ставка электромеханика [242, 300], руб./ч, $\tau_{\text{эм}} = 128,50$ руб./ч.

Техническое обслуживание переносного дизельного генератора проводят каждый раз перед началом эксплуатации, а текущий ремонт – после сезонной эксплуатации один раз в год. На практике количество поливов дождевальными машинами составляет 5–20 раз. Приняв количество запусков дизельного генератора $n_{\text{ТОдг}} = 10$, определим затраты на заработную плату:

$$I_{\text{зпдг}} = (1,2 \cdot 10 + 12,5) \cdot 128,5 = 3148,25 \text{ руб.} \quad (6.62)$$

Затраты на материалы при выполнении обслуживания и текущего ремонта определяются согласно рекомендациям [300]:

$$I_{\text{мдг}} = 1,3 \dots 2,5 I_{\text{зпкл}}; \quad (6.63)$$

$$I_{\text{мдг}} = 1,5 \cdot 3148,25 = 4722,37 \text{ руб.} \quad (6.64)$$

В затраты на производственные и организационные нужды для данного источника питания входят также затраты на горюче-смазочные материалы (ГСМ) и топливо автомобиля, на котором передвигается обслуживающий персонал не только для обслуживания, но и для транспортирования дизельного топлива, а также издержки времени на доставку персонала в прямом и обратном направлениях:

$$I_{\text{одг}} = (2l_{\text{нп}}c_{1\text{км}} + t_{\text{и}}\tau_{\text{эм}})n_{\text{ТОдг}}n_{\text{ТРдг}}; \quad (6.65)$$

$$I_{\text{одг}} = (2 \cdot 3 \cdot 4,55 + 1 \cdot 128,50) \cdot 10 \cdot 1 = 1558 \text{ руб.} \quad (6.66)$$

Амортизационные отчисления зависят от стоимости дизельного генератора. Определим эти отчисления согласно [300] по формуле:

$$A_{\text{окл}} = a_0 K_{\text{дг}}; \quad (6.67)$$

$$A_{\text{одг}} = 0,04 \cdot 265430 = 10617,2 \text{ руб.} \quad (6.68)$$

Риск появления ущерба из-за отказа или аварии (не запуска) дизельного генератора:

$$R_{\text{дг}} = Q_{\text{о-дг}}(t_{\text{сез}})(Y_{\text{Г}} + Y_{\text{Рдг}}), \quad (6.69)$$

где $Q_{\text{о-дг}}(t_{\text{сез}})$ – вероятность отказа дизельного генератора при сезонном использовании ДМ, $Q_{\text{о-дг}}(t_{\text{сез}}) = 0,05$ [97, 100, 231].

Ущерб на ремонт согласно [118]:

$$Y_{\text{Рдг}} = 0,5(I_{\text{зпдг}} + I_{\text{мдг}}); \quad (6.70)$$

$$Y_{\text{Рдг}} = 0,5 \cdot (3148,25 + 4722,37) = 3935,31 \text{ руб.} \quad (6.71)$$

Риск появления ущерба при использовании дизельного генератора:

$$R_{дг} = 0,05 \cdot (12672 + 3925,31) = 830,36 \text{ руб.} \quad (6.72)$$

Годовые эксплуатационные затраты на дизельный генератор:

$$Z_{дгmin} = 98666,09 + 3148,25 + 4722,37 + 1558 + \\ + 10617,2 + 830,36 = 119542,27 \text{ руб.}; \quad (6.73)$$

$$Z_{дгmax} = 602585,09 + 3148,25 + 4722,37 + 1558 + \\ + 10617,2 + 830,36 = 623461,27 \text{ руб.} \quad (6.74)$$

Годовые эксплуатационные затраты на аккумуляторный источник питания с солнечными батареями можно рассчитать по формуле (6.36), но с учетом допущения, что затраты на ресурс отсутствуют, так как для восполнения энергии аккумуляторов использован возобновляемый источник энергии:

$$Z_{акб} = I_{ракб} + I_{зпакб} + I_{макб} + I_{оакб} + A_{оакб} + R_{акб}. \quad (6.75)$$

Тогда затраты на ресурс при аккумуляторном источнике питания будут равны затратам на работу насоса водоподачи:

$$I_{ракб} = \bar{P}_n t_{сез} \eta_{ЭЭ}; \quad (6.76)$$

$$I_{ракбmin} = 75 \cdot 205 \cdot 5,51 = 84716,25 \text{ руб.}; \quad (6.77)$$

$$I_{ракбmax} = 75 \cdot 1252 \cdot 5,51 = 517389 \text{ руб.} \quad (6.78)$$

Затраты на заработную плату обслуживающего персонала определяются также по трудоемкости ТО и ТР аккумуляторного источника питания. В состав ТО входят работы по техническому обслуживанию согласно [300], а в состав ТР – работы по консервации аккумуляторов и солнечных батарей на зимний период, согласно рекомендациям [12]:

$$I_{зпакб} = (T_{ТОакб} + T_{ТРакб}) \tau_{Э}, \quad (6.79)$$

где $T_{ТОакб}$ и $T_{ТРакб}$ – трудоемкость ТО и ТР аккумуляторного источника питания с солнечными батареями, чел.-ч, по данным [12], разовое $T_{ТОакб} = 3,5$ чел.-ч; $T_{ТРакб} = 9,5$ чел.-ч.

Техническое обслуживание аккумуляторного источника питания проводят также каждый раз перед началом эксплуатации – $n_{ТОакб} = 10$, а текущий ремонт – после сезонной эксплуатации один раз в год.

$$I_{\text{зпакб}} = (3,5 \cdot 10 + 9,5) \cdot 128,5 = 5718,25 \text{ руб.} \quad (6.80)$$

Затраты на материалы при выполнении обслуживания и текущего ремонта определяют согласно рекомендациям [12, 22, 28, 66, 175]:

$$I_{\text{макб}} = 0,2 \dots 0,5 I_{\text{зпкл}}; \quad (6.81)$$

$$I_{\text{макб}} = 0,25 \cdot 5718,25 = 1429,56 \text{ руб.} \quad (6.82)$$

В затраты на производственные и организационные нужды для данного источника питания входят затраты на горюче-смазочные материалы (ГСМ) и топливо автомобиля, на котором передвигается обслуживающий персонал, а также издержки времени на доставку персонала в прямом и обратном направлениях:

$$I_{\text{оакб}} = (2I_{\text{нп}}c_{1\text{км}} + t_{\text{и}}\tau_{\text{эм}})n_{\text{ТОакб}}n_{\text{ТРаКб}}; \quad (6.83)$$

$$I_{\text{оакб}} = (2 \cdot 3 \cdot 4,55 + 1 \cdot 128,50) \cdot 10 \cdot 1 = 1558 \text{ руб.} \quad (6.84)$$

Амортизационные отчисления зависят от стоимости аккумуляторного источника питания с возобновляемыми источниками энергии. Определим эти отчисления согласно [300] по выражению:

$$A_{\text{оакб}} = a_0 K_{\text{акб}}; \quad (6.85)$$

$$A_{\text{оакб}} = 0,04 \cdot 562055 = 22482,2 \text{ руб.} \quad (6.86)$$

Риск появления ущерба из-за отказа или аварии (не запуска) при использовании аккумуляторного источника питания:

$$R_{\text{акб}} = Q_{\text{о-акб}}(t_{\text{сез}})(Y_{\text{Т}} + Y_{\text{РаКб}}), \quad (6.87)$$

где $Q_{\text{о-акб}}(t_{\text{сез}})$ – вероятность отказа дизельного генератора при сезонном использовании ДМ, $Q_{\text{о-акб}}(t_{\text{сез}}) = 0,1$ [175, 204, 228, 230].

Ущерб на ремонт согласно [118]:

$$Y_{\text{РаКб}} = 0,5(I_{\text{зпакб}} + I_{\text{макб}}); \quad (6.88)$$

$$Y_{\text{РаКб}} = 0,5 \cdot (5718,25 + 1429,56) = 3573,91 \text{ руб.} \quad (6.89)$$

Риск появления ущерба при использовании аккумуляторного источника питания:

$$R = 0,1 \cdot (12672 + 3573,91) = 1624,59 \text{ руб.} \quad (6.90)$$

Годовые эксплуатационные затраты на аккумуляторный источник питания:

$$Z_{\text{акбmin}} = 84716,25 + 5718,25 + 1429,56 + 1558 + \\ + 22482,2 + 1624,59 = 117528,85 \text{ руб.} \quad (6.91)$$

$$Z_{\text{акбmax}} = 517389 + 5718,25 + 1429,56 + 1558 + \\ + 22482,2 + 1624,59 = 550201,6 \text{ руб.} \quad (6.92)$$

Сведем данные составляющих эксплуатационных затрат в таблицу 6.19.

Таблица 6.19 – Годовые эксплуатационные затраты

| № п/п | Наименование затрат | Кабельная линия | | Дизельный генератор | | Аккумуляторы с солнечными батареями | |
|-------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| | | $t_{\text{сезmin}}$ | $t_{\text{сезmax}}$ | $t_{\text{сезmin}}$ | $t_{\text{сезmax}}$ | $t_{\text{сезmin}}$ | $t_{\text{сезmax}}$ |
| 1 | Затраты на ресурс, руб. | 87088 | 531875 | 98666 | 602585 | 84716 | 517389 |
| 2 | Затраты на заработную плату обслуживающего персонала, руб. | 2775,6 | | 3148,25 | | 5718 | |
| 3 | Затраты на материалы, руб. | 1110,24 | | 4722,37 | | 1429 | |
| 4 | Затраты на производственные и организационные нужды, руб. | 467,40 | | 1558 | | 1558 | |
| 5 | Амортизационные отчисления, руб. | 17338 | | 10617 | | 22482 | |
| 6 | Технологический ущерб, руб. | 12672 | | 12672 | | 12672 | |
| 7 | Ущерб на ремонт, руб. | 1942,92 | | 3935,31 | | 3573 | |
| 8 | Риск появления ущерба, руб. | 146,15 | | 830,36 | | 1624 | |
| 9 | Годовые эксплуатационные затраты | 108926 | 553714 | 119542 | 623461 | 117528 | 550201 |

Рассчитаем показатели эффективности рассматриваемых источников питания.

Удельные эксплуатационные затраты:

$$z_{yi} = \frac{z_i}{(\bar{P}_{\text{ДМ}} + \bar{P}_{\text{Н}})t_{\text{сез}}}; \quad (6.93)$$

$$z_{\text{укл}} = \frac{z_{\text{кл}}}{(\bar{P}_{\text{ДМ}} + \bar{P}_{\text{Н}})t_{\text{сез}}} = \frac{553714}{(75 + 2,1) \cdot 1252} = 5,73 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}; \quad (6.94)$$

$$z_{\text{удг}} = \frac{z_{\text{дг}}}{(\bar{P}_{\text{ДМ}} + \bar{P}_{\text{Н}})t_{\text{сез}}} = \frac{623461}{(75 + 2,1) \cdot 1252} = 6,45 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}; \quad (6.95)$$

$$z_{\text{уакб}} = \frac{z_{\text{акб}}}{(\bar{P}_{\text{ДМ}} + \bar{P}_{\text{Н}})t_{\text{сез}}} = \frac{550201}{(75 + 2,1) \cdot 1252} = 5,69 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}. \quad (6.96)$$

Сравнивая удельные эксплуатационные затраты, определим, что годовая экономия эксплуатационных затрат \mathcal{E}_{Gi} кабельной линии и аккумуляторного питания относительно дизельного генератора:

$$\mathcal{E}_{Gi} = (z_{удг} - z_{yi})(\bar{P}_{дм} + \bar{P}_н)t_{сез}; \quad (6.97)$$

$$\mathcal{E}_{Гкл} = (6,45 - 5,73) \cdot (75+2,1) \cdot 1252 = 69501,03 \text{ руб.}; \quad (6.98)$$

$$\mathcal{E}_{Гакб} = (6,45 - 5,69) \cdot (75+2,1) \cdot 1252 = 73362,19 \text{ руб.} \quad (6.99)$$

Годовая экономия эксплуатационных затрат аккумуляторного источника питания относительно кабельной линии:

$$\mathcal{E}_{Гакб} = (5,73 - 5,69) \cdot (75+2,1) \cdot 1252 = 3861,17 \text{ руб.} \quad (6.100)$$

Срок окупаемости рассматриваемых вариантов определить сложно, так как эффект от использования того или иного источника питания будет неизменным. В таком случае необходимо рассматривать дождевальную машину целиком. Рассчитаем срок окупаемости дополнительных капиталовложений, причем за базисный вариант примем источник питания в виде дизельного генератора:

$$T_{ОДКi} = \frac{K_i - K_{дг}}{\mathcal{E}_{Gi}}; \quad (6.101)$$

$$T_{ОДКкл} = \frac{K_{кл} - K_{дг}}{\mathcal{E}_{Гкл}} = \frac{433470 - 265430}{69501,03} = 2,4 \text{ года}; \quad (6.102)$$

$$T_{ОДКакб} = \frac{K_{акб} - K_{дг}}{\mathcal{E}_{Гакб}} = \frac{562055 - 265430}{73362,19} = 4,0 \text{ года.} \quad (6.103)$$

Срок окупаемости дополнительных капиталовложений аккумуляторного источника питания относительно кабельной линии:

$$T_{ОДКакб} = \frac{K_{акб} - K_{кл}}{\mathcal{E}_{Гакб}} = \frac{562055 - 433470}{3861,17} = 33,3 \text{ года.} \quad (6.104)$$

Капиталовложения в кабельную линию зависят от удаленности централизованной энергосистемы. При $l_{нп} = 4000$ м капиталовложения в кабельную линию увеличиваются, тогда срок окупаемости:

$$T_{ОДКакб} = \frac{K_{акб} - K_{кл}(l_{нп}=4000м)}{\mathcal{E}_{Гакб}} = \frac{562055 - 561960}{3861,17} = 0,02 \text{ года.} \quad (6.105)$$

Если удаленность от централизованной энергосистемы $l_{\text{нп}} > 4000$ м, то при сравнении аккумуляторного источника питания с солнечными батареями кабельная линия оказывается экономически нецелесообразной.

Рассчитаем чистый дисконтированный доход и индекс доходности дополнительных капиталовложений в кабельную линию и аккумуляторный источник питания с солнечными батареями относительно источника в виде дизельного генератора.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) дополнительных капиталовложений:

$$\text{ЧДД}_i = \frac{\sum_0^T K_{\text{Д}i}}{(1+E)^t} - \frac{\sum_1^T \mathcal{E}_{\text{Г}i}}{(1+E)^t}, \quad (6.106)$$

где $K_{\text{Д}i}$ – дополнительные капиталовложения в i -й источник питания, руб.; $\mathcal{E}_{\text{Г}i}$ – годовая экономия эксплуатационных затрат, руб.; E – норма дисконта или коэффициент реновационных отчислений, $E = 0,15$ [242, 300]; T – горизонт расчета, лет; t – номер шага расчета по годам, начиная с момента эксплуатации нового источника питания.

Индекс доходности ИД согласно [242, 300]:

$$\text{ИД}_i = \frac{\text{ЧДД}}{\sum_0^T K_{\text{Д}i}}. \quad (6.107)$$

Результаты расчета ЧДД и ИД приведены в таблицах 6.20 и 6.21.

Таблица 6.20 – Результаты расчета чистого дисконтированного дохода и индекса доходности дополнительных капиталовложений в кабельную линию

| Показатель | Горизонт расчета, лет | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Дополнительные капиталовложения, тыс. руб. | 168,04 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Годовая экономия, тыс. руб. | 0 | 69,5 | 69,5 | 69,5 | 69,5 | 69,5 | 69,5 | 69,5 | 69,5 |
| Дисконтный множитель | 1 | 0,870 | 0,756 | 0,658 | 0,572 | 0,497 | 0,432 | 0,376 | 0,327 |
| Приведенная разность, тыс. руб. | –168,04 | 60,5 | 52,5 | 45,7 | 39,8 | 34,5 | 30,0 | 26,1 | 22,7 |
| Чистый дисконтированный доход, тыс. руб. | 143,87 | | | | | | | | |
| Индекс доходности, руб./руб. | 0,85 | | | | | | | | |

**Таблица 6.21 – Результаты расчета чистого дисконтированного дохода
и индекса доходности дополнительных капиталовложений
в аккумуляторный источник питания с солнечными батареями**

| Показатель | Горизонт расчета, лет | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Дополнительные капиталовложения, тыс. руб. | 296,62 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Годовая экономия, тыс. руб. | 0 | 73,36 | 73,36 | 73,36 | 73,36 | 73,36 | 73,36 | 73,36 | 73,36 |
| Дисконтный множитель | 1 | 0,870 | 0,756 | 0,658 | 0,572 | 0,497 | 0,432 | 0,376 | 0,327 |
| Приведенная разность, тыс. руб. | – 296,62 | 63,82 | 55,46 | 48,27 | 41,96 | 36,46 | 31,69 | 27,58 | 23,99 |
| Чистый дисконтированный доход, тыс. руб. | 32,62 | | | | | | | | |
| Индекс доходности, руб./руб. | 0,11 | | | | | | | | |

Положительное значение чистого дисконтированного дохода за период рассмотрения 8 лет свидетельствует о том, что с учетом различных экономических факторов дополнительные капиталовложения при сравнении кабельного источника питания с источником питания от дизельного генератора будут оправданны, и ЧДД составит 143,87 тыс. руб.; при сравнении аккумуляторного источника питания с солнечными батареями ЧДД составит 32,62 тыс. руб. Индекс доходности для дополнительных капиталовложений в кабельный источник питания ИД близкий к 1,0 свидетельствует о том, что при сравнении с дизельным переносным генератором капиталовложения в кабельную линию с экономических позиций являются более привлекательными, чем в аккумуляторный источник питания, у которого $ИД \ll 1$.

При рассмотрении экономических показателей сравниваемых вариантов питания электрифицированной дождевальная машины, расположенной на расстоянии менее 4000 м от централизованной сети электроснабжения, определено, что оправданным будет использование кабельного источника питания. При большей удаленности ($l_{\text{нп}} > 4000$ м) экономически целесообразным является аккумуляторный источник питания, но по индексу доходности видно, что при действии других факторов (например, при меньшей нагрузке ДМ, т. е. $t_{\text{сези}} < t_{\text{сезмакс}}$) в качестве ис-

точника питания экономически целесообразно использовать переносной дизельный генератор.

Сведем данные экономических расчетов в таблицу 6.22.

Таблица 6.22 – Техничко-экономические показатели сравнения аккумуляторного источника питания с солнечными батареями

| Показатель | Вариант источников питания электрифицированной дождевальнoй машины | | |
|--|--|------------------|--|
| | переносной дизельный генератор (базисный вариант) | кабельная линия | аккумуляторы с солнечными батареями |
| Маркировка устройства | 10 кВ·А АД-10-Т400 | кабель АВВГ 4×16 | аккумуляторы Delta-12-65 солнечные батареи Solar 200 |
| Количество | 1 шт. | 3000 м | ТАБ – 42 шт. СБ – 23 м ² |
| Стоимость источника питания ДМ, руб. | 265430 | 433470 | 562055 |
| Дополнительные капиталовложения, руб. | – | 168040 | 296625 |
| Годовые затраты на ресурс при минимальном использовании ДМ, руб. ($t_{\text{сез}} = 205$ ч) | 98666 | 87088 | 84716 |
| Годовые затраты на ресурс при максимальном использовании ДМ, руб. ($t_{\text{сез}} = 1252$ ч) | 602585 | 531875 | 517389 |
| Годовые затраты на заработную плату обслуживающего персонала, руб. | 3148 | 2775 | 5718 |
| Годовые затраты на материалы, руб. | 4722 | 1110 | 1429 |
| Годовые затраты на производственные и организационные нужды, руб. | 1558 | 467 | 1558 |
| Годовые амортизационные отчисления, руб. | 17338 | 10617 | 22482 |
| Годовая величина риска появления ущерба, руб. | 830 | 146 | 1624 |
| Годовые максимальные эксплуатационные затраты, тыс. руб. | 623 | 553 | 550 |
| Эксплуатационные затраты за 15 лет эксплуатации ДМ, тыс. руб. | 9345 | 8295 | 8250 |
| Удельные эксплуатационные затраты, руб./кВт·ч | 6,45 | 5,73 | 5,69 |
| Годовая экономия эксплуатационных затрат дополнительных капиталовложений, тыс. руб. | – | 69 | 73 |
| Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, лет | – | 2,4 | 4,0 |
| Чистый дисконтированный доход дополнительных капиталовложений, тыс. руб. | – | 143 | 32 |
| Индекс доходности, руб./руб. | – | 0,85 | 0,11 |

На основе данной технико-экономической оценки можно сделать вывод о том, что применение аккумуляторного источника питания по сравнению с переносным дизельным генератором в одинаковых условиях экономически целесообразно при максимальном ($t_{\text{сез}} > 1250$ ч) использовании дождевальной машины за сезон с дополнительными капиталовложениями 296,6 тыс. руб. и годовой экономией 73,3 тыс. руб. Срок окупаемости дополнительных капиталовложений составит в среднем 4,0 года.

По сравнению с кабельной линией аккумуляторный источник питания ДМ с солнечными батареями становится экономически целесообразным при удаленности от централизованной системы электроснабжения более чем на 4,0 км при указанной стоимости кабеля, тяговых аккумуляторов и солнечных батарей.

Таким образом, при эксплуатации дождевальных машин в условиях, оптимальных для системы энергоснабжения на аккумуляторном источнике питания с возобновляемыми источниками энергии (около 40 ед. в Саратовской области), ожидаемая годовая экономия составит 0,54–2,92 млн руб.

6.7 Выводы по главе

1. На основе теоретических исследований проведены производственные испытания и подтверждены алгоритм и программа выбора оптимального энергоснабжения по критерию наименьшего энергопотребления при эксплуатации дождевальных машин кругового действия в Саратовской области, Чеченской Республике, Волгоградской области. Получены весовые коэффициенты значимых показателей качества системы (для включения в критерий эффективности) по методу экспертных оценок с высоким значением коэффициента конкордации $W_{\text{кон}} = 0,630$. Установлено снижение энергопотребления полива на 10,24–20,87 %, а отклонение теоретического расчета и экспериментальных данных критерия эффективности системы энергоснабжения составляет не более 0,5–3,2 %.

2. Испытан аккумуляторный источник питания дождевальной машины кругового действия с использованием солнечных батарей, обеспечивающий требуемую продолжительность работы электропривода опорных тележек. Отклонение теорети-

ческих и экспериментальных данных продолжительности работы дождевальной машины на аккумуляторном источнике питания с использованием солнечных батарей составляет менее 8 %.

3. Проверено в производственных условиях изменение нагрузки на электропривод при изменении диаметра водораспределительного трубопровода с отклонением теоретических и экспериментальных данных не более 6 % и изменении параметров колес с отклонением теоретических и экспериментальных данных не более 11 %.

4. Использование оптимального энергоснабжения для единицы дождевальной машины кругового действия окупается от 1,75 до 9,24 лет в зависимости от продолжительности использования машины за сезон и цен на энергетические ресурсы. Для Саратовской области переход на оптимальную систему энергоснабжения 10–30 % дождевальных машин позволит экономить в год 10,54–28,92 млн руб. Применение аккумуляторного источника питания по сравнению с переносным дизельным генератором экономически целесообразно при максимальном использовании дождевальной машины за сезон ($t_{\text{сез}} > 1250$ ч), срок окупаемости дополнительных капиталовложений составляет в среднем 4,0 года с годовым экономическим эффектом для Саратовской области 0,54–2,92 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения эффективности технологий искусственного орошения при эксплуатации дождевальных машин кругового действия путем определения условий наименьшего энергопотребления при их эксплуатации разработаны и исследованы новые способы и средства энергосбережения, позволяющие определить оптимальную систему энергоснабжения дождевальных машин кругового действия и в совокупности снизить энергопотребление на 10,2–20,8 %.

1. Анализ эксплуатации дождевальных машин кругового действия позволил установить, что в одних и тех же условиях применяют до 40 вариантов энергоснабжения ДМ, энергопотребление которых существенно различается – в 1,5–4,2 раза. Разработка обобщающего критерия эффективности дождевальных машин кругового действия, объединяющего взаимосвязь различных типов привода, позволяет сравнить их системы энергоснабжения с учетом географических, природно-климатических, технических, технологических, эксплуатационных требований и снизить энергопотребление на 20–22 %.

2. На основе методологии исследования определено, что энергопотребление и эффективность системы энергоснабжения зависят от поливной нормы $m_{\text{пн}}$ ($m_{\text{он}}$), площади поливного участка S , давления потока жидкости на входе в ДМ p , удаленности поливного участка от централизованной энергосистемы $l_{\text{пп}}$ и водоема $l_{\text{в}}$, прироста прибыли от полива $\Delta\Pi$, а также от параметров привода: удельной мощности P' , показателя потерь энергии η' , стоимости системы C , надежности $Q_0(t)$, эксплуатационных затрат z и массы элементов системы $m_{\text{сэ}}$. На основе функционально-структурного анализа синтезированы варианты систем энергоснабжения дождеваль-ных машин кругового действия и установлено, что наиболее эффективными являются системы с электроприводом ($k_{\text{оргЭ}} = 0,26 \dots 0,31$) по сравнению с системами на гидравлическом ($k_{\text{оргГ}} = 0,22$) и механическом ($k_{\text{оргМ}} = 0,21$) приводе.

3. На основе обобщающего критерия эффективности определены зоны, границы и условия применения оптимальных систем энергоснабжения дождеваль-ных машин кругового действия:

- электрический привод – при площади поливного участка $S > 40$ га, удаленности от водоёма $l_b > 1000$ м; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} < 1000$ м предпочтительнее кабельная или воздушная линия; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} > 1000$ м и стоимости ресурса $c_p < 7,5$ руб./кВт·ч рекомендуется аккумуляторное питание, а питание от переносного генератора – при $l_{\text{нп}} > 1000$ м и $c_p > 7,5$ руб./кВт·ч;

- гидравлический привод – при площади поливного участка $S < 40$ га, с входным давлением в трубопроводе $p > 0,35$ МПа и удаленности от водоема $l_b < 1000$ м;

- механический привод – при площади поливного участка $S < 6$ га, с входным давлением в трубопроводе $p < 0,30$ МПа и удаленности от централизованной сети энергоснабжения $l_{\text{нп}} > 10000$ м и водоёма $l_b > 10000$ м.

4. На основе усовершенствованных математических моделей разработаны способы и технические средства повышения энергетической эффективности при эксплуатации дождевальных машин кругового действия:

- снижение энергопотребления на 0,37–1,91 % за счет изменения конструктивных параметров дождевальной машины, влияющих на нагрузку электроприводов опорных тележек;

- снижение потерь энергии (на 0,05–1,00 %) за счет обоснования продолжительности работы дождевальной машины от параметров аккумуляторного источника питания, оснащенных возобновляемыми источниками энергии, при которых в режиме работы электропривода опорной тележки крайней секции ПВ = 100 % для полного заряда аккумуляторов потребуется 5–7 дней (что по длительности совпадает с технологическими простоями между поливами кормовых культур), а при ПВ = 10 % – 1 день;

- снижение энергопотребления на 1,2–3,9 % за счет применения разработанных технических средств: устройства динамической компенсации реактивной мощности, схем управления движением секций ДМ, а также устройства определения угла поворота секции.

5. Исследованием физической и полученной на основе теории планирования эксперимента математической модели аккумуляторного источника питания элект-

тропривода опорной тележки подтверждена зависимость продолжительности движения дождевальная машины с погрешностью менее 8 % и влиянием наиболее значимых факторов: номинальной емкости, ЭДС аккумуляторов и числа пусков электропривода.

На основе физической и математической моделей устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей переменного тока для дождевальных машин, работающих в условиях эксплуатации, оптимальных для систем энергоснабжения с источниками переменного тока (переносной генератор, кабельная линия), установлено, что наибольшее снижение энергопотребления (на 0,32–2,53 %) достигается при емкости конденсаторной батареи $C_{\text{УК-опт}} > 50$ мкФ и продолжительности включения в пусковом режиме устройства $t_{\text{п-опт}} = 2,0 \dots 2,5$ с.

б. В ходе полевых и производственных испытаний установлено: снижение энергопотребления при эксплуатации ДМ с оптимальными системами энергоснабжения на 10,24–20,87 % и отклонением теоретического расчета и экспериментальных данных критерия эффективности на 0,5–3,2 %; отклонение теоретических и экспериментальных данных продолжительности работы дождевальной машины на аккумуляторном источнике питания, оснащенных солнечными панелями, менее 8 %; отклонение теоретических и экспериментальных данных изменения нагрузки на электропривод при изменении конструктивных параметров дождевальной машины не более 11 %.

Использование оптимального энергоснабжения для единицы дождевальной машины кругового действия окупается от 1,75 до 9,24 года в зависимости от продолжительности использования машины за сезон и цен на энергетические ресурсы. Для Саратовской области переход на оптимальную систему энергоснабжения 10–30 % дождевальных машин позволит экономить в год 10,54–28,92 млн руб., а применение аккумуляторного источника питания по сравнению с переносным дизельным генератором экономически целесообразно при максимальном использовании дождевальной машины за сезон ($t_{\text{сез}} > 1250$ ч), срок окупаемости дополнительных капиталовложений в которые составляет в среднем 4,0 года с годовым экономическим эффектом для Саратовской области 0,54–2,92 млн руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Рассмотренные в диссертации способы и средства снижения энергопотребления дождевальных машин требуют учета всех условий эксплуатации и выполнения комплекса проектных и опытно-конструкторских работ. Представленные теоретические и экспериментальные исследования дают основу для создания нормативно-технической документации энергоснабжения дождевальных машин кругового действия, а также производства сопутствующего оборудования, например, электродвигателей постоянного тока со шкалой номинальных мощностей от 280 до 750 Вт, аккумуляторных батарей со шкалой номинальных напряжений от 60 до 150 В и т. п.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

В настоящем диссертационном исследовании приведены и частично раскрыты зависимости параметров процесса полива и системы энергоснабжения от продолжительности выполнения полива как основного параметра энергопотребления. Дальнейшие исследования должны будут ориентированы на оптимальное соотношение мощности и продолжительности выполнения процесса полива, а также на продолжение совершенствования результатов исследований. Интересными научными направлениями являются цифровизация и анализ потребления энергии на каждом этапе выполнения действий системой энергоснабжения дождевальной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдиева, Д. К.* Математическая модель солнечной батареи / Д. К. Абдиева, Л. В. Лыткина. – Наука и мир. – 2015 – № 4 (20). – С. 8–9.
2. *Абдразаков, Ф. К.* Рациональное снижение металлоемкости при конструировании широкозахватных дождевальных машин / Ф. К. Абдразаков, Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев. – Аграрный научный журнал. – 2018. – № 5. – С. 37–42.
3. *Авербух, А. М.* Задачи по релейной защите и методы их решения / А. М. Авербух, Х.А. Рыбак. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 352 с.
4. Автоматика : учебное пособие / К. М. Усанов [и др.]. – Саратов : ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». 2008. – 108 с.
5. Автоматические системы орошения RKD : главный каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.rkd.es. – (Дата обращения : 11.09.2019).
6. Автомобильные аккумуляторные батареи : пособие по программе самообразования / VOLKSWAGEN AG, 2005. – 56 с.
7. Автономная система электропитания с экстремальным регулированием мощности первичных источников энергии / О. А. Донцов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Т. 327. – № 12. – 2016. – С. 35–44.
8. *Агаханян, Т. М.* Интегральные микросхемы : учебное пособие для вузов / Т. М. Агаханян. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 464 с.
9. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата / В. Мельник [и др.]. – Минск – Женева, 2017. – 60 с.
10. *Александров, Г. Н.* Сверхвысокое напряжение / Г. Н. Александров. – Л. : Энергия, 1973. – 184 с.
11. *Александров, И. К.* Энергетический анализ механизмов и машин. Теоретическое и экспериментальное обоснование принципов исследования и определения энергетических потерь в механизмах и машинах : [монография] / И. К. Александров. – Вологда. 2011. – 244 с.

12. *Амерханов, Р. А.* Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии / Р. А. Амерханов. – М. : КолосС, 2003. – 532 с.
13. *Андреев, В. А.* Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах : учебное пособие для студентов / В. А. Андреев. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 231 с.
14. *Аникин, А. С.* Математическая модель литий-железо-фосфатной аккумуляторной ячейки и батареи на ее основе / А. С. Аникин, А. С. Мартьянов // Наука ЮУрГУ : матер. 67-й научной конференции / Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2015. – С. 1152–1157.
15. *Аниферов, Ф. Е.* Машины и орудия для возделывания овощных культур / Ф. Е. Аниферов, Л. А. Ивтодий. – Л. : Колос, 1966. – 216 с.
16. *Аносов, В. Н.* Динамическая модель тяговой аккумуляторной батареи автономного транспортного средства / В. Н. Аносов // Электротехника. – 2007. – Вып. № 9. – С. 41–44.
17. *Аргунов, Б. И.* Элементарная геометрия / Б. И. Аргунов, М. Б. Балк. – М. : Просвещение, 1966. – 368 с.
18. *Арсеньев, Г. С.* Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты / Г. С. Арсеньев, А. Г. Иваненко. – СПб. : Гидрометеиздат, 1993. – 273 с.
19. А. с. 301803 СССР, МПК А1, Н02М 7/12. Схема управления тиристорами / М. Э. Кричевский, Ю. Н. Левицкий (СССР). – № 1084073/24-7 ; заявл. 18.06.1966 ; опубл. 21.04.1971, Бюл. 14. – 2 с.
20. *Асламазов, Л. Г.* Задачи и не только по физике / Л. Г. Асламазов, И. Ш. Слободецкий. – М. : Бюро «Квантум», Техносфера, 2005. – 288 с.
21. *Ауэн, Л. Ф.* Цифровые и переключающие устройства на тиристорах / Л. Ф. Ауэн. – Л. : Энергия, 1974. – 128 с.
22. *Ахмадалиев, У. А.* Контроллер заряда аккумуляторной батареи, позволяющий уменьшить количество солнечных панелей / У. К. Ахмадалиев, Ш. С. Сайитов // Universum : Технические науки. Электротехника. – 2018. – № 2 (47). – С. 40–42.

23. *Бакалов, В. П.* Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. – М. : Радио и связь, 1989. – 528 с.
24. *Бакиров, С. М.* Актуальность разработки робота-исследователя параметров почвы / С. М. Бакиров, Д. В. Митрофанов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 28–31.
25. *Бакиров, С. М.* Анализ использования самоходной электрифицированной рельсовой тележки / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2016. – С. 83–88.
26. *Бакиров, С. М.* Анализ существующих систем слежения и управления автономными электрифицированными машинами / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 18–22.
27. *Бакиров, С. М.* Анализ энергозатрат на дождевальную машину / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 10. – С. 95–98.
28. *Бакиров, С. М.* Влияние загрязнений на производительность солнечных модулей, используемых в полевых условиях / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 22–25.
29. *Бакиров, С. М.* Значение разработки подъемно-транспортного электрифицированного агрегата для теплиц закрытого грунта / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. VII междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2016. – С. 10–11.
30. *Бакиров, С. М.* Обоснование внепланового технического обслуживания солнечных батарей, используемых в качестве источника питания дождевальных машин / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 1. – С. 16–21.
31. *Бакиров, С. М.* Обоснование границ применения систем энергоснабжения дождевальных машин / С. М. Бакиров // Агроинженерия. – 2020. – № 5. – С. 49–56.

32. Бакиров, С. М. Обоснование мощности подъемно-транспортного электрифицированного агрегата / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 5. – С. 61–62.

33. Бакиров, С. М. Обоснование параметров способа питания дождевальной машины от аккумуляторных батарей с зарядом от возобновляемых источников энергии / С. М. Бакиров, С. В. Шлюпиков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 7. – С. 128–137.

34. Бакиров, С. М. Особенности электроснабжения дождевальных машин кругового действия / С. М. Бакиров, Г. С. Котюшко, А. В. Чернов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2017. – С. 10–11.

35. Бакиров, С. М. Оценка применения различных источников энергии дождевальной машины кругового действия / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Междунар. научн.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2019. – С. 310–314.

36. Бакиров, С. М. Перспективы развития дождевальной техники / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 1. – С. 50–55.

37. Бакиров, С. М. Подъемно-транспортный радиоуправляемый электрифицированный агрегат для теплиц / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Фундаментальные и прикладные исследования : проблемы и результаты : сб. матер. XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2017. – С. 71–74.

38. Бакиров, С. М. Проблема быстрого износа аккумуляторных батарей мобильных сельскохозяйственных машин / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 25–28.

39. Бакиров, С. М. Разработка годового графика технической эксплуатации электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / С. М. Бакиров. – Саратов : ИЦ «Наука», 2016. – 59 с.

40. Бакиров, С. М. Разработка классификации учитываемых факторов при обосновании способа энергообеспечения мобильных электрифицированных машин / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Проблемы экономичности и эксплуатации авто-

тракторной техники : матер. междунар. научн.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2019. – С. 315–319.

41. *Бакиров, С. М.* Разработка устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, используемых в составе электроприводов секций дождевальной машины / С. М. Бакиров // Вестник аграрной науки Дона. – 2020. – № 3 (51). – С. 77–85.

42. *Бакиров, С. М.* Разработка устройства определения угла поворота секции дождевальной машины / С. М. Бакиров // Агроинженерия. – 2020. – № 4. – С. 39–43.

43. *Бакиров, С. М.* Разработка электроцикла для сельского хозяйства / С. М. Бакиров, А. Ю. Здобнов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 15–18.

44. *Бакиров, С. М.* Рельсовая электрифицированная тележка / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. VIII Межд. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2017. – С. 17–19.

45. *Бакиров, С. М.* Состояние эксплуатации электрооборудования / С. М. Бакиров, Г. П. Ерошенко // Научное обозрение. – 2014. – № 3. – С. 175–177.

46. *Балясов, П. П.* Разработка и исследование принципиальной схемы выходного каскада управления для подбора силовых тиристоров по параметрам включения / П. П. Балясов, А. В. Мускатиньев // XLVII Огарёвские чтения : матер. науч. конф. – Саранск, 2019. – С. 253–257.

47. *Барзилович, Е. Ю.* Модели технического обслуживания сложных систем : учебное пособие / Е. Ю. Барзилович. – М. : Высш. школа, 1982. – 231 с.

48. *Безменов, А. И.* Практикум по механизации полива сельскохозяйственных культур: учебное пособие / А. И. Безменов. – М. : Высшая школа, 1979. – 175 с.

49. *Белов, А. А.* Совершенствование технологии и сверхвысокочастотных установок для повышения кормовой ценности фуражного зерна : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Белов Александр Анатольевич. – М., 2016. – 309 с.

50. *Белоусов, И. Г.* Оптимальная трехфазная широтно-импульсная модуляция по критерию дисперсии тока в нагрузке / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко // Вест-

ник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2018. – Т.10. – № 3. – С. 575–585.

51. *Белый, И. В.* Основы научных исследований и технического творчества / И. В. Белый, К. П. Власов, В. Б. Клепиков. – Харьков : Выща школа, 1989. – 200 с.

52. *Беляев, А. Н.* Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колесных тракторов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Беляев Александр Николаевич. – Воронеж, 2019. – 430 с.

53. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с.

54. *Болтянский, В. Г.* Теоремы и задачи комбинаторной геометрии / В. Г. Болтянский, И. Ц. Гохберг. – М. : Наука, 1965. – 108 с.

55. *Бордина, Н. М.* Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей / Н. М. Бордина, В. А. Летин // Электротехническая промышленность. Сер. 22. Хим. и физ. источники тока : обзорная информация. – М., 1986. – Вып. 1 (7). – 64 с.

56. *Бородин, И. Ф.* Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов / И. Ф. Бородин, Н. И. Кирилин. – М. : Колос, 1974. – 255 с.

57. *Бортник, И. М.* Основы современной энергетики : в 2 т. : учебник для вузов / под ред. проф. А. П. Бурмана, В. А. Строева ; под общ. ред. чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – Т. 2. Современная электроэнергетика. – 678 с.

58. *Борщенко, М. М.* Атласы ветрового и солнечного климатов России / М. М. Борщенко, И. И. Стадник. – СПб., 1997. – 185 с.

59. *Брель, В. К.* Становление и перспективы развития мелиоративной науки в Поволжском регионе / В. К. Брель // Проблемы повышения эффективности использования водных и земельных ресурсов Поволжья : сб. науч. тр. / ФГНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов : Научная книга, 2011. – С. 13–20.

60. *Бутиков, Е. И.* Физика : учеб. пособие : в 3 кн. / Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев, В. М. Уздин. – М. : Физматлит, 2010. – Кн. 3. Строение и свойства вещества. – 336 с.

61. *Буторин, В. А.* Вопросы теории и инновационных решений при эксплуатации электрооборудования : [монография] / В. А. Буторин, В. И. Чарыков, М. А. Малышев. – Курган : Дамми, 2011. – 206 с.

62. *Буторин, В. А.* Ветроэнергетические установки для электрообеспечения скважинных насосов / В. А. Буторин, А. М. Молчан, В. А. Некрасов // Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте : задачи, проблемы, решения : сб. тр. IV Всерос. (с международным участием) науч.-практ. конф. научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / Южно-Уральский технологический университет. – Челябинск, 2020. – С. 11–13.

63. *Буторин, В. А.* Функция затрат, связанная с запасами для технологического присоединения энергопринимающих устройств к электрическим сетям / В. А. Буторин, Л. А. Саплин, И. Б. Царев // АПК России. – 2020. –Т. 27. – № 1. – С. 85–89.

64. *Буторин, В. А.* Энергосбережение : теория, практика : [монография] / В. А. Буторин, В. И. Чарыков, В. И. Мошкин. – Курган : Курганский государственный университет, 2019. – 146 с.

65. *Варивода, М. С.* Электрооборудование мелиоративных насосных установок / М. С. Варивода, Д. А. Михайлов, И. Г. Стрижков // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : матер. IX Всерос. конф. молодых ученых. – Краснодар : КубГАУ им И. Т. Трубилина, 2016. – С. 328–329.

66. *Варыпаев, В. Н.* Химические источники тока : учебное пособие для хим.-технол. спец. вузов / В. Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский ; под ред. В. Н. Варыпаева. – М. : Высшая школа, 1990. – 240 с.

67. *Ведищев, С. М.* Совершенствование технологий и технических средств приготовления и раздачи кормосмесей в сельскохозяйственных свиноводческих организациях : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Ведищев Сергей Михайлович. – Тамбов, 2018. – 381 с.

68. Вертолет Ми-8АМТ : руководство по технической эксплуатации. Кн. VII. Авиационное оборудование. – М., 1995. – 688 с.

69. *Викторов, Н.* Зарядное устройство для гелевых аккумуляторов малой емкости / Н. Викторов // Радиоаматор. – 2014. – Вып. 11/12. – С. 12–15.

70. *Виноградов, А. Л.* Выбор оптимального варианта с учетом предельных нагрузок при расчете тягового двигателя тракторной трансмиссии / А. Л. Виноградов // *Электрификация сельского хозяйства*. – Л. : Ленинградский сельскохозяйственный институт, 1969. – Т. 113. – 272 с.

71. *Власова, Т. А.* Система удобрений сельскохозяйственных культур : учебное пособие / Т. А. Власова, Н. П. Чекаев. – Пенза, 2017. – 321 с.

72. Внесение минеральных удобрений с водой при дождевании / Ю. А. Москвичев [и др.] // *Дождевание сельскохозяйственных культур : сборник научных трудов ВНИИМ и ТП*. – Коломна, 1973. – Т. IV. – С. 139–153.

73. *Вовденко, К. П.* Прогнозирование долговечности осветительных приборов со светодиодами для условий защищенного грунта : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Вовденко Константин Петрович. – Челябинск, 2013. – 20 с.

74. *Водяников, В. Т.* Экономическая оценка средств электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства и система сельской энергетики : учебное пособие для студентов, аспирантов и специалистов сельской энергетики / В. Т. Водяников. – М. : МГАУ, 1997. – 180 с.

75. *Волович, Г. И.* Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

76. Всероссийский форум сельхозпроизводителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kremlin.ru/events/president/news/57035>

77. Выращивание озимой пшеницы по технологии прямого посева в условиях Ростовской области / Н. А. Зеленский [и др.] // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6. – С. 670.

78. Высокоэффективные гетерофотопреобразователи в системе $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ с двухсторонней чувствительностью / Н. М. Бордина [и др.] // *Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах : II Всесоюзная конференция*. – Ашхабад : Ылым, 1978. – Т. 1. – С. 27.

79. *Галиев, А.* Широтно-импульсная модуляция в генераторах заданной электрической мощности / А. Галиев, А. Орлов // *Приборы и системы. Контроль, управление, диагностика*. – 2007. – № 4. – С. 32–33.

80. *Галкин, В. В.* Солнечные и аккумуляторные батареи ОАО «Сатурн» на космических аппаратах с электронным двигателем / В. В. Галкин // Труды МАИ. – 2012. – № 60. – С. 1–10.
81. *Галушкин, Д. Н.* Разряд щелочных аккумуляторов / Д. Н. Галушкин, Н. Е. Галушкин // Электрохимическая энергетика. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 99–102.
82. Генераторы прямого преобразования тепловой и химической энергии в электрическую / М. М. Колгун [и др.] ; гл. ред. П. В. Нестеров. – М. : ВИНТИ, 1989. – Т. 9. Солнечные элементы и батареи. – 118 с.
83. *Гирке, Р.* Эксперимент по курсу элементарной физики : [пер. с нем.] / Р. Гирке, Г. Шпрокхоф. – М. : Учебно-педагогическое издательство Министерства просвещения РСФСР, 1959. – Ч. 1. – 261 с.
84. *Гмошинский, В. Г.* Теоретические основы инженерного прогнозирования / В. Г. Гмошинский, Г. И. Флиорент. – М. : Наука, 1973. – 304 с.
85. ГОСТ Р 52846–2007. Батареи аккумуляторные свинцовые тяговые. Ч. 1. Основные требования и методы испытаний. – М. : Стандартиформ, 2008. – 11 с.
86. ГОСТ Р МЭК 61056–1–2012. Батареи свинцово-кислотные общего назначения (типы с регулирующим клапаном). Ч. 1. Общие требования, функциональные характеристики. Методы испытаний. – М. : Стандартиформ, 2014. – 15 с.
87. ГОСТ 27.410–87. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1987 – 187 с.
88. ГОСТ Р 51597–2000. Нетрадиционная энергетика. Модули солнечные фотоэлектрические. Типы и основные параметры. – Введ. 01.01.2001. – М. : Госстандарт России ; Изд-во стандартов, 2001. – 4 с.
89. ГОСТ Р МЭК 60896–2–99. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. Ч. 2. Закрытые типы. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 19 с.
90. ГОСТ 12.2.007.12–88. Система стандартов безопасности труда. Источники тока химические. Требования безопасности. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

91. ГОСТ 7463–89. Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия. – Введ. 01.07.90. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 31 с.
92. ГОСТ 17513–72. Электропривод колесных машин тяговый. Термины и определения. – М. : Межгосударственный стандарт, 1972. – 2 с.
93. ГОСТ 30533–97. Электроприводы постоянного тока общего назначения. Общие технические требования. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 19 с.
94. ГОСТ Р 50369–92. Электроприводы. Термины и определения. – М. : Госстандарт России, 1992. – 13 с.
95. Государственная программа Волгоградской области «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия». Утв. постановлением администрации Волгоградской области № 743-п от 26 декабря 2016 г. – Волгоград, 2016. – 95 с.
96. *Григорьев, А. Ю.* Теоретическая механика : динамика материальной точки / А. Ю. Григорьев, Д. П. Малякко, К. А. Григорьев. – СПб., 2015. – С. 66.
97. *Гришанов, Е. В.* Система генерирования электрической энергии на базе солнечных батарей и полупроводникового преобразователя : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Гришанов Евгений Валерьевич. – Новосибирск, 2018. – 276 с.
98. *Гроховский, Д. В.* Основы гидравлики и гидропривод : учеб. пособие / Д. В. Гроховский. – СПб. : Политехника, 2013. – 236 с.
99. *Грушко, И. М.* Основы научных исследований / И. М. Грушко, В. М. Сиденко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Харьков : Вища школа, 1983. – 224 с.
100. *Гук, Ю. Б.* Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
101. *Гуткин, Л. С.* Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л. С. Гуткин. – М. : Советское радио, 1975. – 363 с.
102. *Дегтярев, Г. В.* Обоснование конструктивных параметров низконапорных гидроциклонов / Г. В. Дегтярев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – № 6. – С. 30–32.

103. *Дегтярев, Г. В.* Технологии и средства механической очистки вод малых поверхностных водотоков для орошения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 06.01.02 / Дегтярев Георгий Владимирович. – Краснодар, 2007. – 47 с.

104. Дождевальная машина «Кубань» ЭДМФ : инструкция по эксплуатации. – Л., 1981. – 11 с.

105. Дождевальная машина кругового действия. Оросительная техника T-L Irrigation : руководство оператора [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.tlirr.com. – (Дата обращения : 15.06.2019).

106. Долгосрочная областная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Воронежской области на 2014–2020 годы». Утв. постановлением Правительства Воронежской области № 271 от 03 апреля 2013 г. – Воронеж, 2013.

107. *Драгунова, С. М.* Повышение эффективности рыбозащитных сооружений мелиоративных водозаборов / С. М. Драгунова, Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 9. – С. 69–73.

108. *Егоров, Д. Э.* Оптимизация компенсационных характеристик гибридных силовых фильтров / Д. Э. Егоров, В. П. Довгун // Технологии ЭМС. – 2016. – № 3 (58). – С. 18–26.

109. *Ерошенко, Г. П.* Адаптация эксплуатации электрооборудования к особенностям сельскохозяйственного производства : [монография] / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров. – Саратов : ИЦ «Наука», 2011. – 132 с.

110. *Ерошенко, Г. П.* Значение диагностики в процессе эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, И. Ю. Лошкарёв // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : КУБик, 2012. – С. 84–85.

111. *Ерошенко, Г. П.* Корректирование периодичности ТО и ТР электрооборудования сельскохозяйственного производственного участка / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, С. В. Шлюпиков // Научное обозрение. – 2011. – № 6. – С. 14–20.

112. *Ерошенко, Г. П.* Обоснование корректирования периодичности технического обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве / Г. П. Ерошенко,

С. М. Бакиров // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : Буква, 2013. – С. 102–107.

113. *Ерошенко, Г. П.* Особенности работы электроприводов при случайном характере внешних воздействий / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 7. – С. 45–47.

114. *Ерошенко, Г. П.* Оценка применения солнечных батарей в качестве источника питания мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, С. С. Елисеев // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 1 (29). – С. 70–74.

115. *Ерошенко, Г. П.* Снижение мощности электропривода секции дождевальной машины за счет изменения диаметра водораспределительного трубопровода / Г. П. Ерошенко, Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (55). – С. 178–184.

116. *Ерошенко, Г. П.* Снижение мощности электропривода секции дождевальной машины за счет изменения параметров колес опорной тележки / Г. П. Ерошенко, Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров // АПК России. – 2019. – Т. 26. – № 3. – С. 398–405.

117. *Ерошенко, Г. П.* Экспериментальная установка для испытания полярных конденсаторов в схемах компенсации реактивной мощности / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, Ш. З. Зиниев // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. VI Межд. науч.-практ. конф. – Саратов : ЦеСАин, 2015. – С. 50–52.

118. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко, Ю. А. Медведько, М. А. Таранов. – Ростов н/Д : Терра, 2006. – 590 с.

119. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация электрооборудования : учебник / Г. П. Ерошенко, Н. П. Кондратьева. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 336 с.

120. *Есин, А. И.* Математическое моделирование водопроводящего пояса дождевальных машин / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева // Научная жизнь. – 2017. – № 9. – С. 20–28.

121. *Есин, А. И.* Обоснование применения бустерного насоса с электроприводом крайней секции дождевальнoй машины / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 4. – С. 83–87.

122. *Есин, А. И.* Ресурсосберегающие технологии и дождевальнoе машины кругового действия : [монография] / А. И. Есин, Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев. – Саратов : КУБиК, 2019. – 214 с.

123. *Ещин, Е. К.* Работа асинхронного электродвигателя с устройством плавного пуска / Е. К. Ещин, И. А. Соколов // Электромеханика. – 2016. – № 5 (547). – С. 53–58.

124. *Жиров, М. В.* Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами / М. В. Жиров, В. В. Макаров, В. В. Солдатов. – М. : Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2011. – 208 с.

125. *Журавлева, Л. А.* Оптимизация режима работы электрифицированных дождевальнoе машин кругового действия / Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев, А. Н. Кузнецов // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : матер. I Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Саратов : ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2019. – С. 70–75.

126. *Журавлева, Л. А.* Совершенствование технологических приемов полива дождевальнoе машинами кругового действия «Каскад» / Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев // Мелиорация. – 2019. – № 1 (87). – С. 78–82.

127. *Зедгинидзе, И. Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

128. Значение динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко [и др.] // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 89–93.

129. *Золотокрылин, А. Н.* Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России : засухи, опустынивание, деградация / А. Н. Золотокрылин, Е. А. Черенкова, Т. Б. Титкова. // Аридные экосистемы. – 2018. – Т. 24. – № 1 (74). – С. 13–20.

130. *Зыков, Д. Д.* Система телемеханики магистрального трубопровода на основе связи стандарта GSM : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Зыков Дмитрий Дмитриевич. – Томск, 2007. – 112 с.
131. *Иберла, К.* Факторный анализ : [пер. с нем.] / К. Иберла. – М. : Статистика, 1980. – 398 с.
132. *Иванникова, Н. Ю.* Схемная оптимизация электрической сети по показателю средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии / Н. Ю. Иванникова, В. Г. Сазыкин, А. А. Багметов // Промышленная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 12–17.
133. *Иванов, А. А.* Справочник по электротехники / А. А. Иванов. – Киев : Вища школа, 1984. – 224 с.
134. *Иванчура, В. И.* Модульные быстродействующие стабилизаторы напряжения с ШИМ / В. И. Иванчура, Ю. В. Краснобаев. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 158 с.
135. *Ившин, В.П.* Современная автоматика в системах управления технологическими процессами : учебное пособие / В. П. Ившин, М. Ю. Перухин. – М. : НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 400 с.
136. *Измайлов, А. Ю.* Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве / А. Ю. Измайлов // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 5. – С. 536–538.
137. Инструкция по эксплуатации Bauer – Centerstar 9000 133 EL, 168 EL, 168 E, 203 EL, 203 E. – Фойтсберг, 2003. – 103 с.
138. *Иоссель, Ю. Я.* Расчет электрической емкости : 2-е изд., перераб. и доп. / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 288 с.
139. *Исаев, А. П.* Гидравлика дождевальных машин / А. П. Исаев. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
140. *Калашников, С. Г.* Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1964. – 666 с.
141. *Каленюк, Н. М.* Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические передачи : учебное пособие / Н. М. Каленюк, А. В. Скрипник. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2011. – 248 с.

142. *Карасев, Б. В.* Основы гидравлики, гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение / Б. В. Карасев, В. И. Дечев. – Минск : Ураджай, 1965. – 293 с.

143. *Карлащук, В. И.* Элементы солнечных электростанций / В. И. Карлащук // Инженерный вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 1–32.

144. *Карпов, В. Н.* Метод оценки энергоэффективности потребительских систем АПК / В. Н. Карпов // Электрооборудование : эксплуатация и ремонт. 2019. – № 10. – С. 22–28.

145. *Карпов, В. Н.* Повышение энергоэффективности мобильных автономных агрегатов – дождевальных машин фронтального действия : [монография] / В. Н. Карпов, З. Ш. Юлдашев ; Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – СПб., 2019. – 187 с.

146. *Карташов, Б. А.* Практикум по автоматике / Б. А. Карташов, А. Б. Карташов, Т. В. Жидченко. – зерноград, 2006. – Ч. I. – 156 с.

147. Каталог BAUER. Самая эффективная система под солнцем [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.bauer-at.com. – (Дата обращения : 16.11.2019).

148. Каталог Lindsay. Повышение урожайности пшеницы за счет применения эффективных решений в области орошения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.lindsay.com. – (Дата обращения : 23.10.2019).

149. Каталог T-L Irrigation Company [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.tlirr.com. – (Дата обращения : 08.11.2019).

150. Каталог ирригационной продукции Zimmatic by Lindsay [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.lindsay.com. – (Дата обращения : 23.11.2019).

151. Каталог продукции Valley [Электронный ресурс]. – Режим доступа : / www.valmont.com/irrigation – (Дата обращения : 16.11.2019).

152. Каталог. Отличительные особенности ирригационных машин Reinke [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.reinke.com. – (Дата обращения : 08.11.2019).

153. *Кацман, М. М.* Справочник по электрическим машинам : учеб. пособие / М. М. Кацман. – М. : Академия, 2005. – 480 с.

154. *Кашкаров, А. П.* Аккумуляторы : справочное пособие / А. П. Кашкаров. – М. : РадиоСофт, 2014. – 192 с.
155. *Квитко, А. В.* Перспективы и особенности работы солнечных фотоэлектрических станций / А. В. Квитко, Г. С. Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 131(07). – С. 56–68.
156. *Кешуов, С. А.* Автономный электропривод мобильных сельскохозяйственных машин / С. А. Кешуов. – Алматы : КазНИИНКИ, 1993. – 170 с.
157. *Кешуов, С. А.* Выбор и построение оптимальных систем автономного электропривода рабочих органов мобильных сельскохозяйственных агрегатов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Кешуов С. А. – Алматы, 1994. – 398 с.
158. *Кешуов, С. А.* Режимы работы автономного электропривода мобильных сельскохозяйственных машин / Кешуов С. А. – Алматы : КазгосИНТИ, 1994. – 86 с.
159. *Коженко, Н. В.* Гидравлические исследования расходных характеристик регулирующего органа натурального образца ленточного регулятора воды / Н. В. Коженко, Г. В. Дегтярев // Проблемы и перспективы технических наук : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Аэтерна, 2015. – С. 91–101.
160. *Коженко, Н. В.* Теоретическая модель процесса снижения цены намечаемых мероприятий по водообеспеченности рисового чека / Н. В. Коженко, Т. И. Сафронова, Г. В. Дегтярев // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 3. – С. 19–24.
161. *Коломиец, А. П.* Электропривод и электрооборудование / А. П. Коломиец, Н. П. Кондратьева, И. Р. Владыкин. – М. : КолосС, 2008. – 328 с.
162. *Кондрашов, В. Ф.* Машины для орошения : учеб. пособие / В. Ф. Кондрашов, Т. А. Гаврилов. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. – 51 с.
163. *Кондратьева, Н. П.* Выбор кабельных линий 0,4 кВ для тепличных комбинатов / Н. П. Кондратьева, Д. А. Филатов, П. В. Терентьев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК, – 2019. – № 2 (35). – С. 17–25.
164. *Коробатов, Д. В.* Система автоматической очистки поверхности солнечного модуля / Д. В. Коробатов, О. В. Серадская, Е. А. Сироткин // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – № 11–12 (199–200). – С. 59–67.

165. *Корсак, В. В.* Проблема глобального потепления и дегумификация пахотных земель / В. В. Корсак, А. Н. Никишанов, К. В. Гузенко // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. трудов по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г. Энгельс, 2016. – С. 63–67.

166. *Коршунов, Ю. М.* Математические основы кибернетики : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Коршунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1980. – 424 с.

167. *Костюк, В. И.* Проектирование сельского электроснабжения : учебное пособие / В. И. Костюк, Л. Н. Солуянов, А. Л. Хайкин. – Саратов, 1995. – 193 с.

168. *Котельникова, Е. А.* Организационно-экономические основы и управление бизнесом в агропромышленном комплексе : учебное пособие / Е. А. Котельникова, К. С. Кондаков. – Саратов : ЦеСАин, 2017. – 162 с.

169. *Кристенсен, Р.* Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – М. : Мир, 1974. – 340 с.

170. *Кузнецов, Е. В.* Повышение эффективности орошения в составе инвестиционного проекта адаптированной земельно-охранной системы / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, А. Н. Куртнезирова // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 52. – С. 206–211.

171. *Кутьков, Г. М.* Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г. М. Кутьков. – М. : КолосС, 2004. – 504 с.

172. *Лебедев, Б. М.* Дождевальные машины. Теория и конструкции : учебник для вузов / Б. М. Лебедев. – М. : Машиностроение, 1965. – 255 с.

173. *Линенко, А. В.* Принципы построения и расчет линейных асинхронных электроприводов сложного колебательного движения для технологических машин АПК / А. В. Линенко, М. Ф. Туктаров, Т. И. Камалов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т.11. – № 3. – С. 44–49.

174. *Левин, М. А.* Теория качения деформируемого колеса / М. А. Левин, Н. А. Фуфаев. – М. : Наука, 1989. – 272 с.

175. *Лукутин, Б. В.* Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учебное пособие / Б. В. Лукутин,

И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.

176. *Любая, С. И.* Система капельного полива / С. И. Любая, А. Н. Юрченко // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона : Междунар. науч.-практ. конф. – Ставрополь : Параграф, 2014. – С. 74–76.

177. *Мажугин, Е. И.* Машины для эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов : учебное пособие / Е. И. Мажугин. – Горки : БГСХА, 2010. – 335 с.

178. *Мажугин, Е. И.* Мелиоративные машины : учебное пособие : в 2 ч. / Е. И. Мажугин, А. Л. Казаков. – Горки : БГСХА, 2018. – Ч. 2. – 172 с.

179. *Махлаёв, В. К.* Гидравлика. Основы гидродинамики : учеб. пособие / В. К. Махлаёв. – Томск : Изд-во Томского гос. архит.-строит. ун-та, 2006. – 69 с.

180. *Машины і обладнання для зрошування : посібник / за ред. В. І. Кравчука, В. А. Сташука.* – Дослідницьке : УкрНДПВТ ім. Погорілого, 2011. – 112 с.

181. *Машиностроение : энциклопедия / К. В. Фролов [и др.].* – М. : Машиностроение, 2012. – Т. 4–2. Электроприводы – 520 с.

182. *Машиностроение : энциклопедия / К. В. Фролов [и др.].* – М. : Машиностроение, 2003. – Т 1–1. Математика. – 992 с.

183. *Машиностроение : энциклопедия / И. П. Ксенович [и др.] ; под ред. И. П. Ксеновича.* – М., 2002. – Т. 4–16. Сельскохозяйственные машины и оборудование. – 720 с.

184. *Медведев, А. В.* Мелиоративная техника – основа устойчивого сельскохозяйственного производства / А. В. Медведев // Мелиорация в России : потенциал и стратегия развития : матер. Междунар. науч.-практ. интернет-конф., посвященной 50-летию масштабной программы развития мелиорации земель. – Волгоград, 2016. – С. 305–313.

185. *Меламед, М. Д.* О перспективах рынка зарубежных дождевальных машин в России / М. Д. Меламед, Е. И. Кормыш, К. В. Губер // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 5 – С. 50–52.

186. *Мелешко, Е. А.* Быстродействующая импульсная электроника / Е. А. Мелешко. – М. : Физматлит, 2007. – 320 с.

187. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение : справочник / под ред. Б. Б. Шумакова. – М. : Колос, 1999. – 432 с.
188. Механизация полива : справочник / Б. Г. Штепа [и др.] – М. : Агропромиздат, 1990. – 336 с.
189. *Миркина, Е. Н.* Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение : учебное пособие / Е. Н. Миркина, М. П. Горбачева ; ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : ИЦ «Наука», 2019. – 134 с.
190. Моделирование динамики автомобиля : руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.umlabor.ru. – 2010. – 73 с. – (Дата обращения : 15.05.2019).
191. Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин / Д. А. Соловьев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 7. – С. 81–84.
192. *Некрасов, А. И.* Совершенствование системы технического сервиса и повышение эффективности работы сельских электроустановок : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Некрасов Алексей Иосифович. – Москва, 2007. – 275 с.
193. *Некрасов, А. И.* Синтез оптимальных систем электробезопасности в сельском хозяйстве / А. И. Некрасов, В. Осипенко, Л. А. Репина. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 9. – С. 32–33.
194. *Нефедьев, А. И.* Ваттметр – счётчик электроэнергии для электровелосипеда / А. И. Нефедьев // Радио. – 2015. – № 9. – С. 44–45.
195. *Николадзе, Г. И.* Водоснабжение : учебник для вузов / Г. И. Николадзе, М. А. Сомов. – М. : Стройиздат, 1995. – 688 с.
196. *Новик, Ф. С.* Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем / Ф. С. Новик. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
197. *Обухов, С. Г.* Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации / С. Г. Обухов, И. А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
198. *Озолин, М.* Вольтметр постоянного тока с матричным индикатором на светодиодах / М. Озолин // Радио. – 2010. – № 4 – С. 19–21.

199. *Онищенко, С. В.* Автономные энергоэффективные жилые здания усадебного типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Онищенко Сергей Владимирович. – Краснодар, 2009. – 159 с.
200. Орошение в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.fregat.mk.ua. – (Дата обращения : 15.06.2019).
201. Основы механики жидкости : учеб. пособие / В. Н. Белозерцев [и др.]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 324 с.
202. Основы научных исследований : учебник для техн. вузов / В. И. Крутов [и др.] ; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М. : Высшая школа, 1989. – 400 с.
203. Основы электропривода и применение электрической энергии в сельском хозяйстве / Г. И. Назаров [и др.]. – М. : Колос, 1965. – 392 с.
204. *Оськин, С. В.* Надежность электрических установок как часть энергосберегающей стратегии / С. В. Оськин, А. В. Мирошников // Чрезвычайные ситуации : промышленная и экологическая безопасность. – 2016. – № 2–3 (26–27). – С. 91–102.
205. *Оськин, С. В.* Электрический привод / С. В. Оськин, Н. И. Богатырев. – Краснодар : КРОН, 2016. – 490 с.
206. *Оськин, С. В.* Электротехнологические установки : учебник / С. В. Оськин. – Краснодар : КРОН, 2016. – 339 с.
207. *Оськин, С. В.* Энергосбережение в насосных установках экологически безопасных систем мелиорации и орошения / С. В. Оськин, В. А. Дидыч // Чрезвычайные ситуации : промышленная и экологическая безопасность. – 2013. – № 3 – 4 (15–16). – С. 145–154.
208. *Панарина, В. И.* Развитие отечественного семеноводства – основа импортозамещения в агропромышленном комплексе России / В. И. Панарина, А. А. Полухин // Экономика и управление отраслями, комплексами на основе инновационного подхода (в рамках научной школы Т. Т. Цатхлановой) : матер. конф. / ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова». – Элиста, 2017. – С. 108–109.
209. Пат. 158228 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/18. Устройство целевой компенсации реактивной мощности / Ерошенко Г. П., Бакиров С. М., Шлюпиков С. В., Зиниев Ш. З. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратов-

ский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2015109546/07 ; заявл. 18.03.2015 ; опубл. 27.12.2015, Бюл. № 36 – 2 с. : ил.

210. Пат. 180746 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СПК А 01 G 25/09. Многоопорная дождевальная машина кругового действия с гидроприводом / Рязанцев А. И., Антипов А. О., Рембалович Г. К., Ахтямов А. А., Евсеев Е. Ю. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». – № 2018107819 ; заявл. 02.03.2018 ; опубл. 22.06.2018, Бюл. № 18. – 5 с.

211. Пат. 189495 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СПК А 01 G 25/09, Y 02 P 60/122. Автономная электрифицированная секция дождевальной машины кругового действия / Бакиров С. М., Ерошенко Г. П., Трушкин В. А., Соловьев Д. А., Елисеев С. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2019103591 ; заявл. 08.02.2019 ; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15 – 6 с. : ил.

212. Пат. 192669 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СПК А 01 G 25/09. Дождевальная машина / Шушпанов И. А., Рыжко Н. Ф., Смирнов Е. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «ВолжНИИГиМ». – № 2019116418 ; заявл. 28.05.2019 ; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 27. – 5 с.

213. Пат. 2522526 С 1 Российская Федерация, МПК А 01G 25/16, А 01G 25/09, G 01 N 25/56, G 01 S 19/05. Устройство автоматизированного управления многоопорной дождевальной машиной фронтального действия для точного полива / Карпов В.Н., Смелик В.А., Юлдашев З.Ш., Юлдашев Р.З. ; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «СПбГАУ», Карпов Валерий Николаевич. – № 2012153613/13 ; заявл. 11.12.2012 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 20 с.

214. Пат. 2632492 С Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09. Многофункциональная дождевальная машина / Кошкин Н. М., Кошкин А. Н., Карев В. Ю., Захаров Ю. В. ; заявитель и патентообладатель Карев Валерий Юрьевич. – № 2015139909 ; заявл. 18.09.2015 ; опубл. 05.10.2017, Бюл. № 28 – 9 с. : ил.

215. Пат. 2663153 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/469, С 02 F 1/461, СПК С 02 F 1/4693, С 02 F 1/46104. Электроактиватор воды / Оськин С. В., Цокур Д. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный

аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – № 2017124279 ; заявл. 07.07.2017 ; опубл. 01.08.2018, Бюл. № 22. – 6 с.

216. Пат. 2707919 Российская Федерация, МПК А 01 В 61/00, А 01 G 25/09, СПК А 01 В 61/00, А 01 G 25/09, А 01 В 69/002. Устройство определения угла поворота секции дождевальнoй машины кругового действия / Бакиров С. М., Ерoшенко Г. П., Трушкин В. А., Соловьев Д. А., Елисеев С. С. ; заявитель и патентo-обладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова». – № 2019103602 ; заявл. 08.02.2019 ; опубл. 02.12.2019, Бюл. № 34 – 4 с. : ил.

217. *Петров, М. В.* О возможностях поставок продукции АПК в Китай [Электронный ресурс] / М. В. Петров // пленарное заседание : «Экспортный потенциал АПК : зерновые, зернобобовые, масличные культуры, масложировая, мясная, кондитерская продукция» ; Программа 10-го Сельскохозяйственного Форума «Саратов-агро. День поля. 2019». – Режим доступа : <http://expo.sofit.ru/exhibitions/saratov-agro-den-polya-2019/8998/>. – (Дата обращения : 10.08.2019).

218. *Петько, В. Г.* Методика определения установленной мощности генератора и передаточного отношения редуктора для ветроагрегата / В. Г. Петько, И. А. Рахимжанова, М. Б. Фомин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4 (72). – С. 952–956.

219. Полив дождеванием / под общ. ред. канд. с.-х. наук И. А. Безменова. – Саратов : Приволж. кн. изд-во, 1979. – 175 с.

220. *Пономаренко, О. И.* Расчёт технологических потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6-10/0,4 кВ на среднесрочных интервалах времени / О. И. Пономаренко, С. Н. Редин, О. В. Дичина / Энергетик. – 2016. – № 4. – С. 3–9.

221. Приказ Минсельхоза РФ от 28 сентября 2018 г. № 443 «О реализации мероприятий направления (подпрограммы) «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России» Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы» [Электронный ресурс] : Документы Министерства сельского хозяйства РФ. – Режим доступа : <http://agroportal2.garant.ru:81/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения 10.08.2019).

222. Приказ Минсельхоза РФ от 6 марта 2013 г. № 128 «Об утверждении отраслевой программы «Развитие свиноводства в Российской Федерации на 2013-2015 годы» [Электронный ресурс] : Документы Министерства сельского хозяйства РФ. – Режим доступа : <http://agroportal2.garant.ru:81/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения 10.08.2019).

223. *Прищеп, Л. Г.* Учебник сельского электрика / Л. Г. Прищеп. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1986. – 509 с.

224. Проблемы повышения эффективности использования водных и земельных ресурсов Поволжья : сб. науч. тр. / ФГНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов : Научная книга, 2011. – 290 с.

225. *Путин, В. В.* Драйвер роста российской экономики / В. В. Путин // Экономика сельского хозяйства России. – 2018. – № 3. – С. 2–5.

226. *Пьянов, В. С.* Методы повышения производства зерна в хозяйствах России интенсификацией работы парка зерноуборочных комбайнов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Пьянов Виктор Сергеевич. – Ставрополь, 2017. – 315 с.

227. *Пястолов, А. А.* Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования / А. А. Пястолов, А. А. Мешков, А. Л. Вахрамеев. – М. : Колос, 1981. – 335 с.

228. *Рабинович, М. Д.* Сравнение различных методов представления климатической информации при расчетной производительности гелиосистем / М. Д. Рабинович // Гелиотехника. – 1986. – № 3. – С. 76–77.

229. Распределение ресурсов при риск-ориентированном обслуживании электрооборудования / Г. П. Ерошенко [и др.] // Научное обозрение. – 2017. – № 21. – С. 83–86.

230. *Рауниенбах, Г.* Справочник по проектированию солнечных батарей : пер. с англ. / Г. Рауниенбах. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

231. Рекомендации по научно обоснованным технологиям орошения сельскохозяйственных культур кукурузы на зерно, картофеля, лука и моркови современными стационарными широкозахватными круговыми и фронтальными дождевальными машинами Reinke и Valley в условиях центральной орошаемой зоны Ростовской области / под ред. Н. А. Иванова ; Новочерк. гос. мелиор. акад. – Новочеркасск, 2013. – 30 с.

232. *Рудаков, В. В.* Электроприводы с тиристорными коммутирующими и регулирующими устройствами : учебное пособие / В. В. Рудаков. – Л. : Изд-во ЛГИ, 1985. – 101 с.

233. Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкции. Машина дождевальная электрифицированная круговая «Кубань-ЛК1М» («Каскад») / ООО «Мелиомаш». – Саратов : Амирит, 2015. – 102 с.

234. Регулирование расхода воды дождевальных машин для снижения потребления электроэнергии на полив / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : матер. I Национальной науч.-практ. конф. с международным участием. – Саратов, 2019. – С. 105–109.

235. Результаты создания дождевальной машины «Фрегат», работающей в режимах при низких напорах / Д. А. Соловьев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 2. – С. 67–69.

236. Рекомендации по снижению потребления электроэнергии при поливе многоопорными дождевальными машинами / Н. Ф. Рыжко [и др.]. – Энгельс, 2019. – 25 с.

237. Ремонт автотракторного электрооборудования / А. П. Смелов [и др.]. – М. : Колос, 1968. – 231 с.

238. *Рывкин, А. А.* Справочник по математике : справочное пособие для учащихся сред. спец. учеб. заведений и поступающих в вузы / А. А. Рывкин, А. З. Рывкин, Л. С. Хренов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1987. – 480 с.

239. *Рыжко, Н. В.* Модернизация дождевальных машин «Фрегат» на низконапорный режим работы / Н. В. Рыжко, М. С. Органов, С. В. Ботов // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. трудов по матер. научно-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г. – Энгельс, 2016. – С. 110–115.

240. *Рязанцев, А. И.* Снижение энергетических затрат на движение многоопорных электрифицированных дождевальных машин / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, А. В. Цветков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2016. – № 1 (29). – С. 83–86.

241. *Савочкин, В. А.* Тяговая динамика колесного трактора : учебное пособие для студентов вузов / В. А. Савочкин. – М. : МГТУ «МАМИ», 2005. – 97 с.
242. *Сазонова, Д. Д.* Аллокативная и техническая эффективности фермерских хозяйств / Д. Д. Сазонова, С. Н. Сазонов // Научные доклады : независимый экономический анализ / Московский общественный научный фонд : АНО «Независимый экономический аналитический центр по проблемам деятельности крестьянских (фермерских) хозяйств». – М., 2010. – № 208. – 160 с.
243. *Сазыкин, В. Г.* Аспекты влияния изношенного электрооборудования на электрохозяйство / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков // Путь науки. – 2015. – № 3(13). – С. 46–50.
244. *Сазыкин, В. Г.* Оптимизация электрической сети по показателям надежности SAIDI, SAIFI с использованием платформы PSS®SINCAL / В. Г. Сазыкин, А. А. Багметов // Промышленная энергетика. – 2019. – № 11. – С. 2–9.
245. *Сазыкин, В. Г.* Характеристика воздействий электричества на растительные объекты / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 2. – С. 18–21.
246. *Сапухин, А. А.* Основы гидравлики : учебное пособие с задачами и примерами их решения / А. А. Сапухин, В. А. Курочкина. – М. : МГСУ, 2014. – 112 с.
247. *Селиванов, М. Н.* Качество измерений : метрологическая справочная книга / М. Н. Селиванов, А. Э. Фридман, Ж. Ф. Кудряшов. – Л. : Лениздат, 1987. – 295 с.
248. Сельскохозяйственные машины (устройства, работа и основные регулировки) : учеб. пособие / В. А. Романенко [и др.]. – Краснодар : КубГАУ, 2014. – 232 с.
249. *Сериков, С. А.* Идентификация математической модели тяговой аккумуляторной батареи гибридного автомобиля / С. А. Сериков // Автомобильный транспорт. – 2010. – Вып. 26. – С. 23–30.
250. *Синягин, Н. Н.* Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики / Н. Н. Синягин, Н. А. Афанасьев, С. А. Новиков. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978. – 408 с.
251. *Скалин, А. В.* Электрические машины и аккумуляторные батареи тепловозов (конструкция, ремонт и испытание) / А. В. Скалин, В. Ф. Бухтеев, В. Е. Кононов. – М. : Желдориздат ; Трансинфо, 2005. – 232 с.

252. *Скорик, Е.* Суперконденсаторы – новые элементы электрической цепи / Е. Скорик // Радиоаматор. – 2014. – Вып. 11–12. – С. 25–27.
253. *Славин, Р. М.* Электрическая новь фермы / Р. М. Славин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1990. – 255 с.
254. Совершенствование гидромелиоративных машин с автоматизацией процесса полива / А. А. Ахтямов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агро-технологического университета им. П. А. Костычева. – 2019. – № 3 (43). – С. 64–68.
255. Современные системы капельного орошения и машины для дождевания: учебное пособие / А. Н. Цепляев [и др.]. – Волгоград : ФГБОУ ВПО «Волгоградский ГАУ», 2012. – 96 с.
256. *Соловьев, В. А.* Энергоэффективная дождевальная машина нового поколения / В. А. Соловьев // Актуальные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения : матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. / СГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2018. – С. 262–266.
257. *Соловьев, Д. А.* Влияние режима движения дождевальных машин на норму полива / Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева // Вестник АПК Верхневолжья. – 2018. – № 1 (41). – С. 38–43.
258. *Соловьев, Д. А.* Разработка электрической схемы логического управления движением секций ДМ, исключающей одновременный запуск электродвигателей / Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров, Г. Н. Камышова // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2020. – № 3 (55). – С. 119–123.
259. *Соловьев, Д. А.* Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации дождевальных машин кругового действия / Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 4. – С. 93–97.
260. Состояние и перспективы выращивания масличных культур на Украине в условиях изменения климата / А. В. Мельник [и др.] // Наука и Мир. – 2015. – Т. 1. – № 10 (26). – С. 113–116.
261. Справочник по мелиорации и гидротехнике / под. ред. проф. М. М. Гришина. – М. : Государственное издательство колхозной и совхозной литературы, 1937. – Т. II. Изыскания и исследования. – 730 с.

262. Справочник по механизации орошения / Б. Г. Штепа [и др.] ; под ред. Б. Г. Штепы. – М. : Колос, 1979. – 303 с.
263. Справочник по орошаемому земледелию / под ред. проф. Н. А. Мосиенко. – Саратов : Приволж. кн. изд-во, 1993. – 432 с.
264. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
265. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.
266. Справочник энергетика / В. И. Григорьев [и др.]. – М. : Колос, 2006. – 488 с.
267. Справочник энергетика промышленных предприятий. Теплоэнергетика / В. Н. Юренев [и др.]. – М. – Л. : Энергия, 1965. – 512 с.
268. *Стафеев, А. П.* Скоро мы будем орошать всю территорию Украины [Электронный ресурс] : Интервью председателя правления ПАО «Завод «Фрегат» / А. П. Стафеев. – Режим доступа : <http://fregat.mk.ua/blog/aleksandr-stafeev-skoro-prividetsya-oroshat-vsyu-territoriyu-ukrainy/>. – (Дата обращения : 10.08.2019).
269. Стационарные свинцово-кислотные герметизированные необслуживаемые аккумуляторы : эксплуатационная документация. – М. : Акку-Фертриб, 2011. – 17 с.
270. *Стрижков, И. Г.* Снижение потерь энергии в электроприводе мобильных насосов / И. Г. Стрижков, Р. Р. Бегляров, Е. Н. Чеснюк // Чрезвычайные ситуации : промышленная и экологическая безопасность. – 2011. – № 1–3. – С. 71.
271. *Стрижков, И. Г.* Электрооборудование технологических комплексов орошаемого земледелия: дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Стрижков Игорь Григорьевич. – Краснодар, 2001. – 318 с.
272. *Стрижков, И. Г.* Электропривод оросительного насоса на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой / И. Г. Стрижков, Р. Р. Бегляров // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – № 16. – С. 197–199.
273. *Суворин, А. В.* Разработка и чтение электрических схем электроустановок : учеб. пособие / А. В. Суворин. – Красноярск, 2012. – 424 с.

274. *Сырых, Н. Н.* Теоретические основы эксплуатации электрооборудования / Н. Н. Сырых, Н. Е. Кабдин. – М. : Агробизнесцентр, 2007. – 514 с.
275. *Сырых, Н. Н.* Методика применения диагностирующего параметра при стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию / Н. Н. Сырых, А. И. Некрасов, А. А. Некрасов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2–2. – С. 144–149.
276. *Таранов, М. А.* Использование полюсопереключаемой обмотки на 10/6 полюсов для ступенчатого пуска электродвигателей насосной станции дождеваль-ной машины «Кубань» / М. А. Таранов, А. Н. Филатов // Инженерно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса : сб. науч. тр. / Всесоюзная ордена Ленина и Трудового Красного Знамени академия сельскохозяйственных наук (ВАСХНИЛ), Всероссийское отделение ; Всероссийский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ВНИПТИМЭСХ). – Зерноград, 1987. – С. 153–156.
277. *Таранов, М. А.* Системный анализ надежности и перспективы её повышения для систем электроснабжения потребителей / М. А. Таранов, П. Т. Корчагин // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – С. 55–58.
278. *Таркивский, В. Е.* Цифровые методы и средства определения функциональных характеристик сельскохозяйственных тракторов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Таркивский Виталий Евгеньевич. – М., 2019. – 232 с.
279. *Текучев, И. К.* Инновационная технология обслуживания 400 дойных ко-ров при привязном содержании электромобильными агрегатами многофункцио-нального назначения / И. К. Текучев, Л. П. Кормановский // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 2. – С. 276–278.
280. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заве-дений / М. З. Коловский [и др.]. – 3-е изд., испр. – М. : Академия, 2008. – 560 с.
281. Тестер емкости АКБ. Автоматический. SKAT-T-AUTO : руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.bast.ru. – (Дата обра-щения : 09.10.2019).

282. Типовая инструкция по безопасности труда для аккумуляторщика, выполняющего техническое обслуживание и ремонт тяговых и стартерных аккумуляторных батарей : РД 31.82.18-83. – М., 1984. – С. 149–153.

283. Тиристорный пускатель асинхронных двигателей АС11 : руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : triolcorp.ru. – (Дата обращения : 11.11.2019).

284. *Тирринг, В.* Курс математической и теоретической физики : [монография] : пер. с нем. / В. Тирринг. – Киев : Timrani, 2004. – 264 с.

285. *Трушкин, В. А.* Математическая модель устройства заряда аккумуляторной батареи от возобновляемых источников энергии / В. А. Трушкин, О. Н. Чурляева, А. В. Иванов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 284–286.

286. *Трушкин, В. А.* Обоснование мощности рельсовой электрифицированной тележки / В. А. Трушкин, С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 6. – С. 65–67.

287. *Трушкин, В. А.* Современные способы диагностирования электроустановок : учебное пособие для студентов магистерской программы «Электрооборудование и электротехнологии» / В. А. Трушкин, С. М. Бакиров. – Саратов : ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2016. – 87 с.

288. *Турапин, С. С.* Технические средства модернизации дождеобразующего пояса электрифицированных дождевальных машин / С. С. Турапин, А. Н. Жирнов // Природообустройство. – 2011. – № 1. – С. 29–33.

289. Тяговые характеристики многоопорных дождевальных машин / А. И. Рязанцев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 85–89.

290. *Фалеев, Д. С.* Основные характеристики солнечных модулей. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 28 с.

291. Федеральная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы». Постановление Правительства Российской Федерации № 922 от 12 октября 2013 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/70478356/>

292. *Федюнина, Т. В.* Основы гидротехники и теплотехники : учебное пособие / Т. В. Федюнина, Е. Н. Миркина ; ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : ИЦ «Наука», 2018. – 150 с.
293. *Фокин, Б. П.* Повышение эффективности полива многоопорными дождевальными машинами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 06.01.02 / Фокин Борис Павлович. – Ставрополь, 2002. – 52 с.
294. *Фокин, Б. П.* Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин / Б. П. Фокин, А. К. Носов. – Ставрополь, 2011. – 80 с.
295. *Фохт, А. С.* Функциональный анализ / А. С. Фохт. – М. : Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики, 2001. – Ч. 1. – 97 с.
296. *Френкель, Н. З.* Гидравлика / Н. З. Френкель. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
297. *Хакимов, Р. Т.* Повышение энергоэффективности автотракторной техники на основе совершенствования топливной системы газового двигателя : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Хакимов Рамиль Тагирович. – М., 2019. – 305 с.
298. *Харман, Г.* Современный факторный анализ : пер. с англ. / Г. Харман. – М. : Статистика, 1972. – 477 с.
299. *Холин, К. М.* Основы гидравлики и объемные гидроприводы : учебник для учащихся сред. спец. учеб. завед. / К. М. Холин, О. Ф. Никитин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
300. *Хорольский, В. Я.* Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, Д. В. Петров. – Ростов н/Д : Терра, 2004. – 168 с.
301. *Хрусталеv, Д. А.* Аккумуляторы / Д. А. Хрусталеv – М. : Изумруд, 2003. – 224 с.
302. *Черепанов, Г. П.* Теория качения : решение проблемы Кулона / Г. П. Черепанов // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55. – № 1. – С. 218–226.
303. *Чижиумов, С. Д.* Основы гидродинамики : учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2007. – 106 с.
304. *Шадских, В. А.* Перспективные научные разработки для решения проблем агропромышленного комплекса в условиях изменения климата / В. А. Шадских, В. Е.

Кижяева, И. В. Ткаченко / Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. тр. по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г. – Энгельс, 2016. – С. 79–86.

305. Шакарян, Ю. Г. Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазопоротными устройствами (ч. 1) / Ю. Г. Шакарян, В. К. Фокин, А. П. Лихачев // Электричество. – 2014. – № 7. – С. 16–26.

306. Шакиров, Ю. И. Автономные источники тока: учебное пособие / Ю. И. Шакиров. – Набережные Челны : Изд -во Кам. гос. инж.-экон. акад., 2012. – 313 с.

307. Шахмейстер, А. Х. Логарифмы / А. Х. Шахмейстер. – 5-е изд., исправ. и доп. – СПб. : Виктория плюс, 2016. – 288 с.

308. Шевчук, С. А. Зміни зволоженості Українського Полісся та їх наслідки / С. А. Шевчук, В. І. Вишневський // Екологічні науки : науково-практичний журнал. – 2019. – № 3(26). – 194 с.

309. Шепелев, А. Е. Зарубежные системы орошения / А. Е. Шепелев, В. Э. Завалюев // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. трудов по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ». Энгельс, 25–27 мая 2016 г. – Энгельс, 2016. – С. 134–140.

310. Шерьязов, С. К. Ветроэлектрические установки в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей : [монография] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев. – Челябинск : Южно-Уральский ГАУ, 2018. – 184 с.

311. Шерьязов, С. К. Энергосбережение как основа развития энергетики / С. К. Шерьязов, В. А. Новикова, Е. С. Соколова. // Приоритетные направления развития энергетики в АПК : сб. статей по матер. II Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Под общ. ред. С. Ф. Сухановой, 22 февраля 2018 г. – Курган, 2018. – С. 171–174.

312. Электрические измерения : учебник для вузов / под ред. А. В. Фремке. – 4-е изд. – Л. : Энергия, 1973. – 424 с.

313. Эксплуатационная надежность гидротехнических сооружений : учебное пособие / Ф. К. Абдразаков [и др.] ; ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : Издательский центр «Наука», 2018. – 142 с.

314. Электрические системы : управление переходными режимами электроэнергетических систем : учебник / В. А. Веников [и др.] ; под ред. В. А. Веникова. – М. : Высшая школа, 1982. – 247 с.

315. Электропривод и применение электрической энергии в сельском хозяйстве / Г. И. Назаров [и др.]. – М. : Колос, 1972. – 446 с.

316. Электротехнический справочник / под общ. ред. проф. И. Н. Орлова. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – кн. 1. Производство и распределение электрической энергии. – 880 с.

317. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т.3 в 2 кн. Кн. 2. Использование электрической энергии / под общ. ред. проф. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. – 6-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоиздат, 1982. – 560 с.

318. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников : учебное пособие / Л. А. Саплин [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Л. А. Саплина. – Челябинск : ЧГАУ, 2000. – 194 с.

319. Эффективность трудосберегающих инноваций в сельском хозяйстве на примере робота – подравнителя кормов / Е. А. Скворцов [и др.] // Аграрный вестник Урала. – 2016. – № 9 (151). – С. 82–88.

320. Юлдашев, З. Ш. Повышение энергоэффективности в технологиях мобильных автономных агрегатов (на примере дождевальных машин фронтального действия) : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Юлдашев Зарифджан Шарифович. – СПб. – Пушкин, 2018. – 412 с.

321. Юлдашев, З. Ш. Показатели энергетической эффективности действующих агроинженерных (технических) систем : [монография] / З. Ш. Юлдашев, В. Н. Карпов ; СПбГАУ. – СПб., 2014. – 159 с.

322. Юрченко, И. Ф. Правила планирования мероприятий технической эксплуатации оросительных систем : учебное пособие / И. Ф. Юрченко, Ю. Г. Злодеев, Г. Х. Ялалова ; Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова. – М., 2019. – С. 70-74.

323. Юфин, А. П. Гидромеханизация : учебник для вузов / А. П. Юфин. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1965. – 491 с.

324. *Яворский, Б. М.* Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 7-е изд., испр. – М. : Наука, 1979. – 942 стр.
325. *Язвинская, Н. Н.* Обобщение уравнения Пейкерта для построения практических моделей аккумуляторов / Н. Н. Язвинская, Д. Н. Галушкин, Н. Е. Галушкин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2019. – № 3 (203). – С. 70–76.
326. *Abdrazakov, F. K.* Electricity consumption decrease at pump stations during watering by multi-support sprinkling units / F. K. Abdrazakov, N. F. Ryzhko, S. N. Ryzhko // Dilemas contemporáneos : Educación, Política y Valores. 2019. – Vol. 6. – No. 3. – P. 74.
327. *Amooi, R.* Operation of an active distribution network with PV and storage battery and vehicle charge station and modeling of uncertainty with copula model / R. Amooi, S. M. Moghaddas-Tafreshi // International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC. – 2019. – 10th. 8697757. – P. 407–414.
328. A novel green service level agreement for cloud computing using fuzzy logic / A. Ragmani [et al.] // CLOSER 2018. Proceedings of the 8th International Conference on Cloud Computing and Services Science. 2018. January. – P. 658–665.
329. Auto-reclosing Control Strategy of Thyristors-based High Voltage DC Hybrid Circuit Breaker [基于晶闸管的混合式高压直流断路器重合闸控制策略] / H. Jia [et al.] // Gaodianya Jishu. High Voltage Engineering. – 2019. – No. 45(1). – P. 46–54.
330. *Bakirov, S. M.* Justification of dependence of the sprinkler machine power supply system efficiency on the irrigation progress parameters / S. M. Bakirov, O. V. Logacheva, S. V. Schlypikov // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA. – 2019. 2020. – P. 012005.
331. *Bakirov, S. M.* Justification of parameters of automatic control system of robot feed distribution in cattle barn / S. M. Bakirov, O. V. Logacheva, S. V. Shlyupikov // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2020. – 422 (1), 012057.
332. Basic theory and methods for managing energy efficiency in consumer systems / V. Karpov [et al.] // Agronomy Research. – 2016. – Vol. 14. – No. 5. – P. 1619–1625.

333. *Bojoi, R.* Efficiency and loss mapping of AC motors using advanced testing tools / R. Bojoi, E. Armando, M. Pastorelli, K. Lang // Proceedings : 22nd International Conference on Electrical Machines, ICEM. – 2016. – 7732654. – P. 1043–1049.

334. Boosting redox activity on MXene-induced multifunctional collaborative interface in high Li₂S loading cathode for high-energy Li–S and metallic Li-free rechargeable batteries / Z. Wang [et al.] // Journal of Energy Chemistry. – 2019. – P. 183–191.

335. *Chen, M.* Modeling and control of a novel hybrid power quality compensation system for 25-kV electrified railway / M. Chen, Y. Chen, M. Wei // Energies. – 2019. – 12 (17). – 3303.

336. Control Methods in Automated Gravity Irrigation systems: A Review / C. Bragalli [et al.] // Conference of Open Innovations Association, Fruct. – FRUCT Oy. – 2018. – 23. – P. 443–446.

337. Delta Battery : Технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.delta-batt.com. – (Дата обращения : 20.06.2019).

338. Discover серии EV: Техническая спецификация батареи [Электронный ресурс]. – URL : www/discoverbattery.com/ru. – (Дата обращения : 20.06.2019)

339. Ecological-energy directions for improving multiple sprinkling machines / A. I. Ryazantsev [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – Vol. 14. – No. 3. – P. 677–685.

340. *Fan, Y.* Participatory Water management and adoption of micro-irrigation systems : smallholder farmers in arid north-western China / Y. Fan, S. Park, Z. Nan // International journal of water resources development. Carfax Publishing Ltd. – 2018. – Vol. 34, 3. – P. 434–452.

341. Fault incidence matrix based reliability evaluation method for complex distribution system / C. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – 33(6). – 8350325. – P. 6736–6745.

342. *Ford, H. O.* Comparison of single-ion conducting polymer gel electrolytes for sodium, potassium, and calcium batteries : Influence of polymer chemistry, cation identity, charge density, and solvent on conductivity / H. O. Ford, C. Cui, J. L. Schaefer // Batteries. – 2020. – No. 6 (1). – P. 11.

343. Justification of the duration of operation of a sprinkler machine electric drive on a accumulator power supply with a charging from solar battery / S. M. Bakirov [et al.] // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 579. – Art. 012106.

344. *Karpov, V. N.* Efficient energy supply for sustainable development of agriculture / V. N. Karpov, Z. Sh. Yuldashev // XXXIV CIOSTA Cigr. V Conference. Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry. 29 June – 01 July 2011. – Vienna – Austria, 2011. -P. 467-474. -№1(17). -С. 44-47.

345. Modes and Parameters of Circular Action Sprinkler electric drives / G. P. Eroshenko [et al.] // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2018. – Vol. 10. – No. 10 Special Issue. – P. 2123–2128.

346. *Nelson, P.* Advanced Lithium-Ion Batteries for Plug-in Hybrid-Electric Vehicles / P. Nelson, K. Amine // Electric Vehicle Symposium . EVS-23, Anaheim, California. – 2007. – P. 151-153.

347. Non-Pneumatic Tire. The future trend for pivot [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.rainfine.cn. – (Дата обращения : 22.11.2018).

348. Optimal configuration of modular cogeneration plants integrated by a battery energy storage system providing peak shaving service / A. Gimelli [et al.] // Applied Energy. – 2019. – Vol. 242. – P. 974–993.

349. Optimal power supply synthesis for circular action sprinkler / G. P. Eroshenko [et al.] // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2018. – Vol. 10. – No. 10 Special Issue. – P. 2129–2134.

350. *Os'kin, S. V.* Key Ways of energy saving in pump units for Melioration and Irrigation systems / S. V. Os'kin, V. A. Didych, A.G. Vozmilov // International Conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM. – Chelyabinsk, 2017. – 8076304.

351. *Oskin, S.* Modeling process of water bubbling with ozone to obtain disinfectant solutions in beekeeping / S. Oskin, D. Tsokur, S. Voloshin // Engineering for Rural Development. – 2019. – P. 1210–1214.

352. *Pohlandt, C.* Variable DC-link voltage powertrain for electrified mobile work machines / C. Pohlandt, M. Geimer // *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS.* – 2015. – May. – 7101525.

353. Principal denudation processes and their contribution to fluvial suspended sediment yields in the upper YANGTZE river basin and VOLGA river basin / G. Valentin [et al.] // *Journal of Mountain Science.* – 2015. – Vol. 12, 1. – P. 101–122.

354. *Soloviev, D. A.* Robotic Irrigative Complex with Intellectual Control System «CASCADE» / D. A. Soloviev, L. A. Juravleva, S. M. Bakirov // *Proceedings of XVIII International Scientific and Practical Conference «Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy».* – 2020. – P. 145–156.

355. *Sonrell, H.* Zeitgemusse Beregnung Verringerung des Wasser – und Energieaufwandes bei mobilen Beregnung maschinen / H. Sonrell // *Landtechnik.* – 1991. – Vol. 46. – No. 5. – S. 209–219.

356. The effect of development in water-saving irrigation techniques on spatial-temporal variations in crop water footprint and benchmarking / W. Wang [et al.] // *Journal of Hydrology.* – 2019. – 577. – 123916.

357. The rationale for the method of powering rail electrified machines / G. P. Eroshenko [et al.] // *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science.* – 2019. – 341 (1). – 012125.

358. The studies of water flow characteristics in the water conducting belt of wide-coverage sprinkling machines / F. K. Abdrazakov [et al.] // *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication.* – TOJDAC. – 2018. – P. 567–577.

359. The study of the process of face milling cutter work by performing service and repair works at irrigation canals / F. K. Abdrazakov [et al.] // *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2016. – Vol. 11. – No. 16. – P. 9613–9621.

360. Trends and insight in heavy-duty vehicle electrification / C. Mol [et al.] // *World Electric Vehicle Journal.* – 2011. – No. 4 (1). – P. 307–318.

361. *Vepraskas, M.* A method to estimate the probabilitie that subsouling will increase cropfield // M. Vepraskas // *Soil Science Society of American Jornal.* – 1988. – Vol. 52. – No. 3. – P. 229–232.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Рисунок П1.1 – Структурная модель гидравлического привода с гидродвигателем вращательного действия



Рисунок П1.2 – Структурная модель гидравлического привода с гидродвигателем возвратно-поступательного действия



Рисунок П1.3 – Структурная модель механического привода



Рисунок П1.4 – Структурная модель электрического привода с кабельным способом питания



Рисунок П1.5 – Структурная модель электропривода с питанием от воздушной линии



Рисунок П1.6 – Структурная модель электропривода с питанием от переносного генератора



Рисунок П1.7 – Структурная модель электропривода с питанием от аккумуляторных батарей



Рисунок П1.9 – Диаграмма функций системы механического привода по методике FAST



Рисунок П2.11 - Диаграмма функций системы электрического привода с питанием от переносного генератора по методике FAST

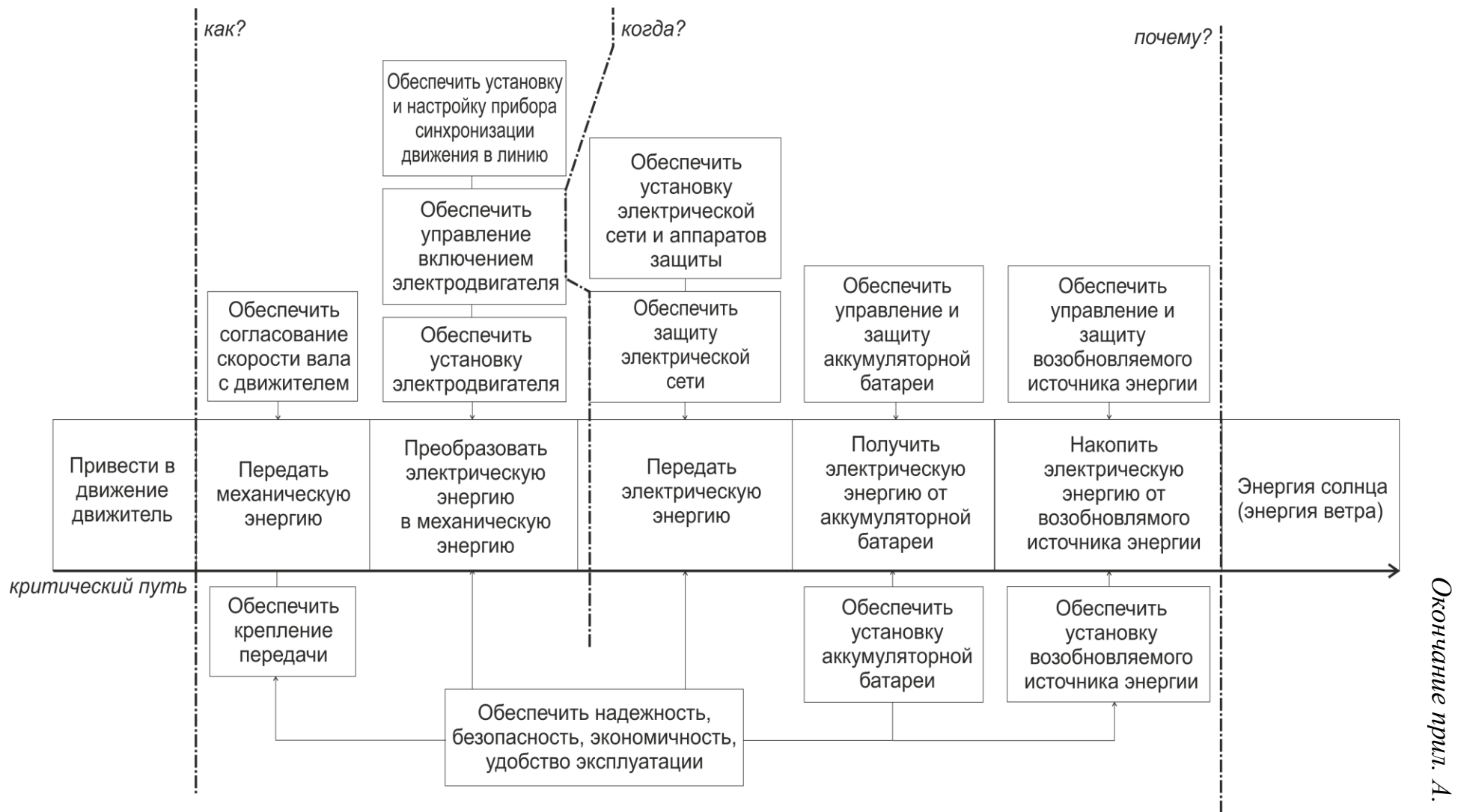


Рисунок П1.12 – Диаграмма функций системы электрического привода с питанием от аккумуляторных батарей по методике FAST

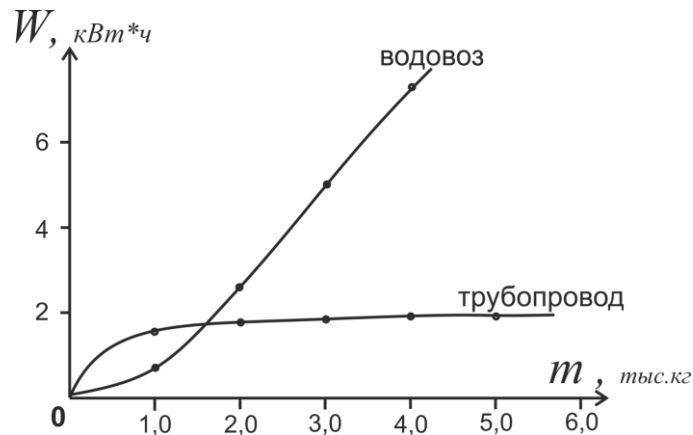
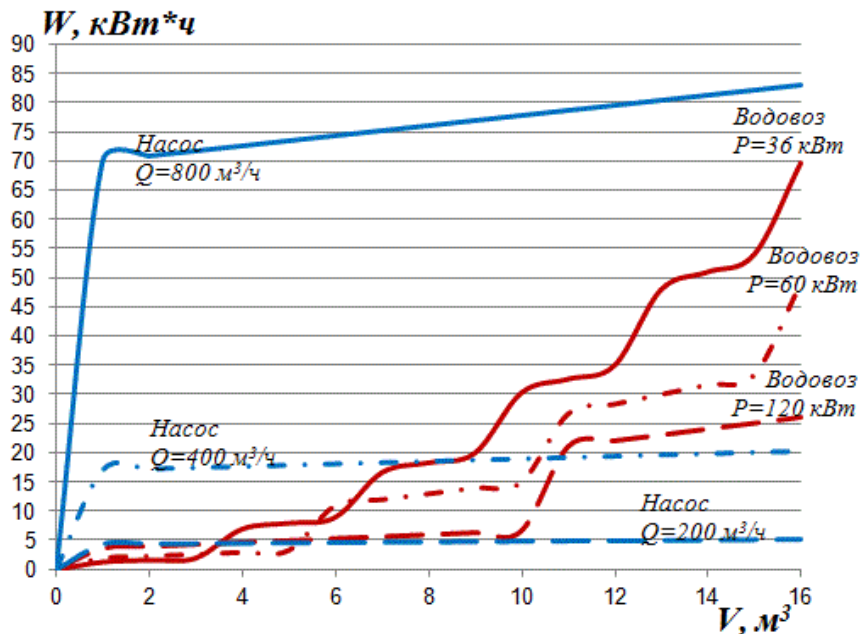


Рисунок П2.1 – Зависимости энергопотребления от массы транспортируемой поливной воды

Рисунок П2.2 – Зависимость энергопотребления при транспортировке поливной воды до 16 м^3 трубопроводом и водовозом (при удаленности поливного участка на 1000 м от водоема)

На рисунке П2.2 приведены графики для насоса с пластиковым трубопроводом диаметром $d = 315 \text{ мм}$ при статистическом напоре $H_0 = 0$. А в качестве водовозов приведены машины с различными массогабаритными размерами и мощностью.

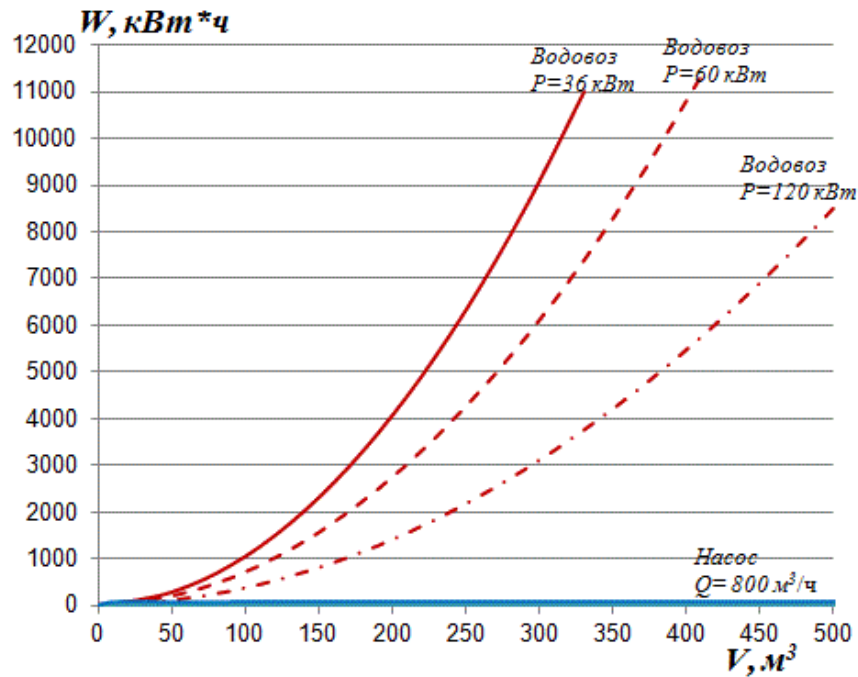


Рисунок П2.3 – Зависимость энергопотребления на транспортирование поливной воды в количестве до 500 м^3 с помощью водовоза и трубопровода с насосом (при удаленности поливного участка на 1000 м от водоема)

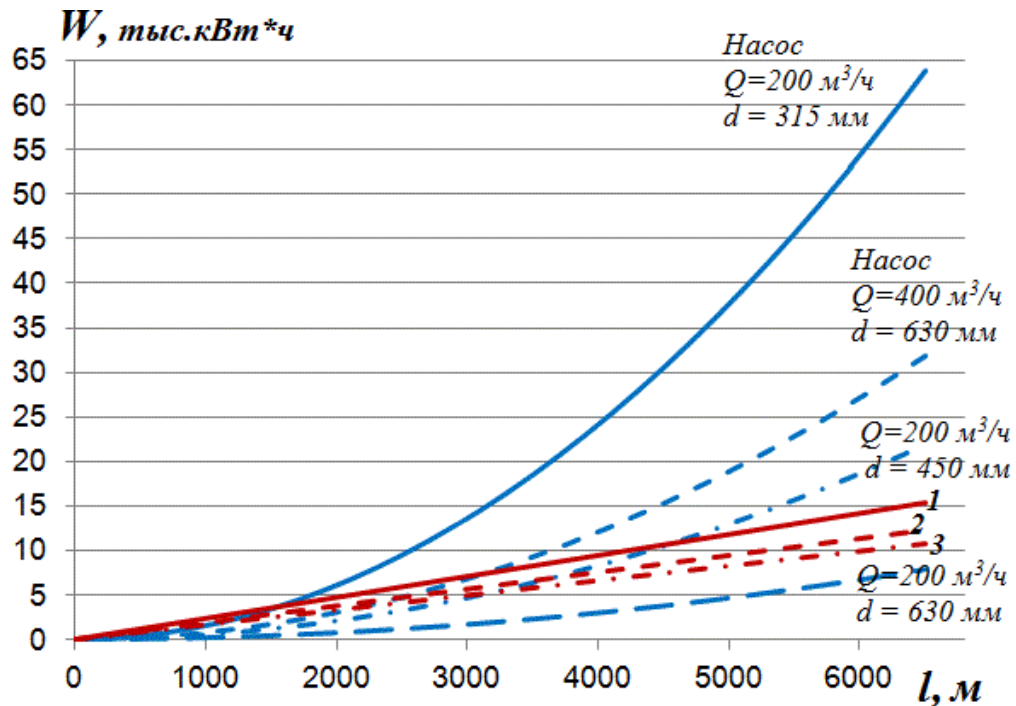


Рисунок П2.4 – Зависимость энергопотребления на транспортирование 1000 кг поливной воды при удаленности участка l (водовоз мощностью 36 кВт : 1 – по асфальтированному покрытию, 2 – по сухому грунтовому покрытию, 3 – по влажному грунтовому покрытию)

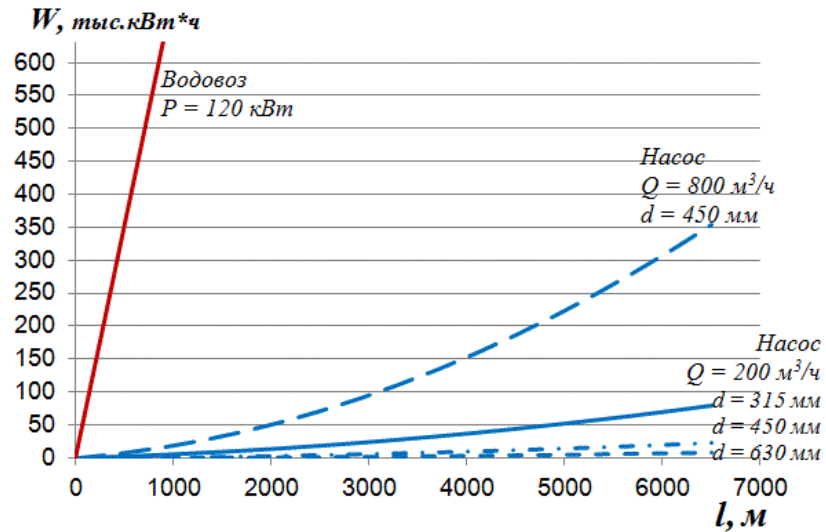


Рисунок П2.5 – Зависимость энергопотребления на транспортировку 300 м³ поливной воды от удаленности участка l

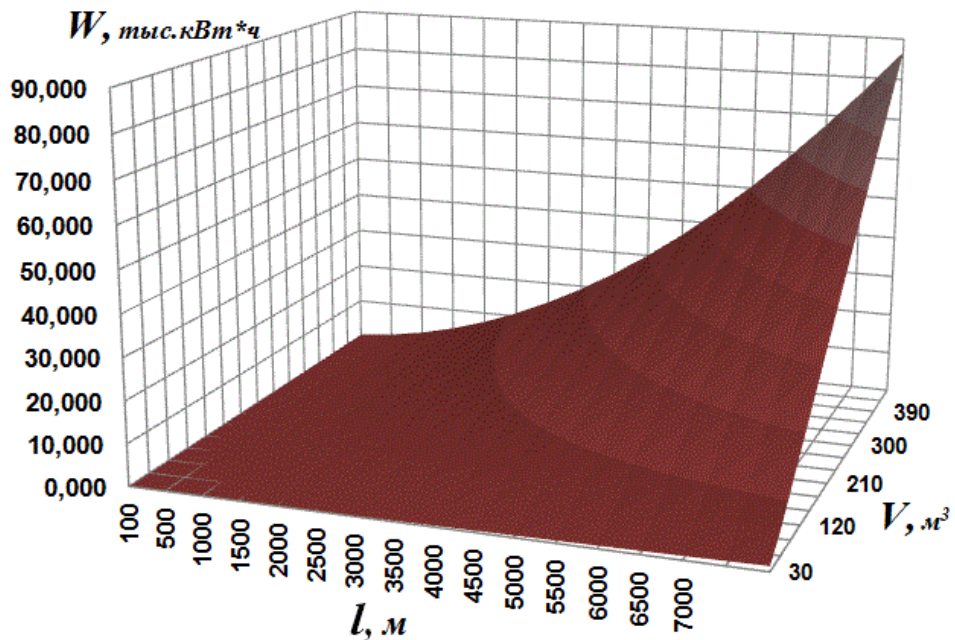


Рисунок П2.6 – Зависимость энергопотребления грузового автомобиля от удаленности l и объема V транспортируемой поливной воды

Энергопотребление насоса

$$W_2 = P_{\text{эл}} \left(\frac{\pi l d^2 + 4V}{4Q} \right). \quad (\text{П2.1})$$

Интегрируя по двум переменным, получим

$$W_{2j} = \int_0^l \int_0^V P_{\text{эл}} \left(\frac{\pi l d^2 + 4V}{4Q} \right) dl dV. \quad (\text{П2.2})$$

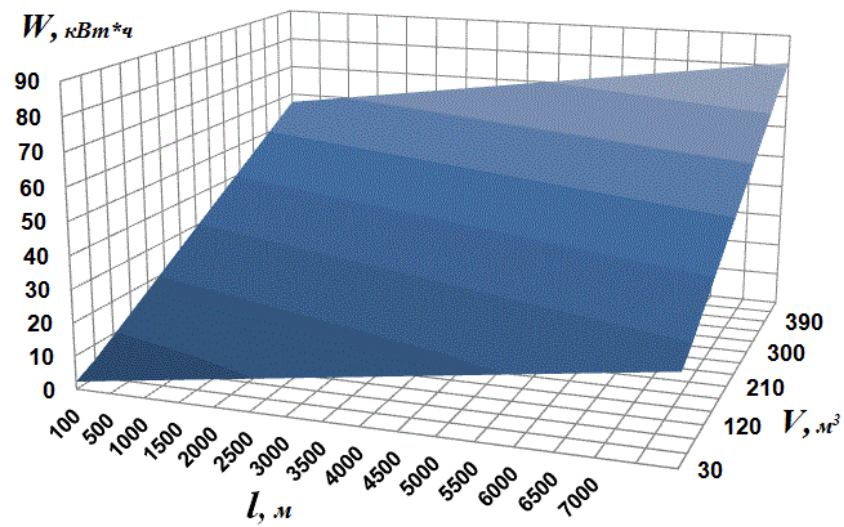


Рисунок П2.7 - Зависимость энергопотребления насоса от удаленности l и объема V транспортируемой поливной воды

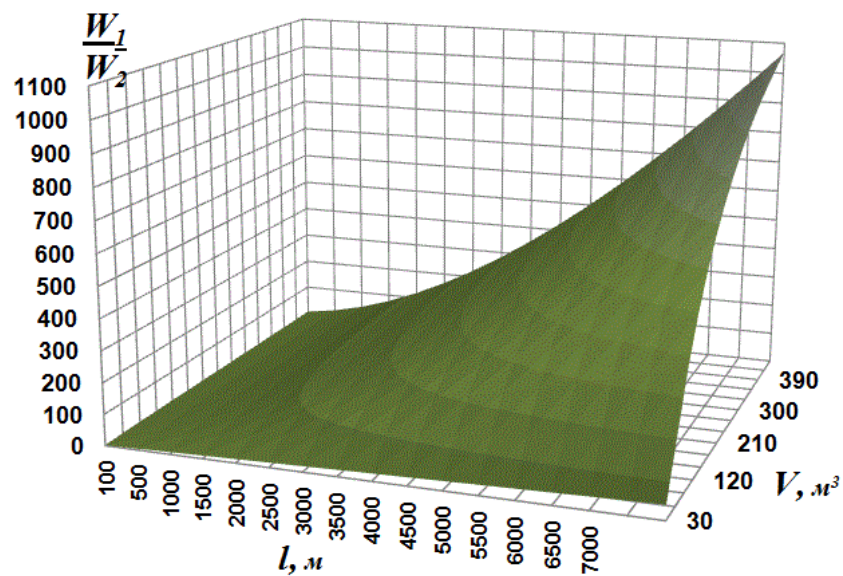


Рисунок П2.8 – Относительное энергопотребление сравниваемых способов транспортирования

Таблица П2.1 – Пределы параметров транспортировки

| Наименование параметра | Диапазон проявления |
|---|--------------------------|
| <i>Электродвигатель колес водовоза</i> | |
| Коэффициент передачи и кратности скоростей вращения | $0,05 < j < 0,2$ |
| Коэффициент трения сцепления поверхностей колес с поверхностью дороги | $0,38 < \mu < 0,8$ |
| Скорость передвижения, м/с | $5,0 < v < 10$ |
| Отношение массы водовоза к массе транспортируемой воды | $0,2 \dots 1,0$ |
| Коэффициент неравномерной нагрузки при изменении рельефа поверхности дороги | $0,9 \dots 1,5$ |
| <i>Электродвигатель насоса</i> | |
| Коэффициент гидравлических потерь в трубопроводе | $0,020 < \lambda < 0,10$ |
| Статистический напор по длине трубопровода, м | $0 < H_0 < 50$ |
| Диаметр трубопровода, м | $0,315 < d < 0,9$ |
| Производительность насоса, м ³ /ч | $200 < Q < 1200$ |
| Коэффициент полезного действия насоса | $0,35 \dots 0,55$ |

При малых объемах транспортировки ($V < 50 \text{ м}^3$) на любое расстояние ($l \rightarrow \infty$) затраты энергии (насоса и водовоза), обусловленные мощностью электродвигателей привода колес водовоза и водонапорного насоса и продолжительностью времени действия этих электродвигателей, сравнительно соизмеримы

- 1) $0,4 < k_w < 1,0$ – при наилучших условиях транспортировки водовозом;
- 2) $k_w \approx 1,0$ – при усредненных (нормальных) условиях транспортировки;
- 3) $1,0 < k_w < 2,5$ – при наилучших условиях транспортирования насосом.

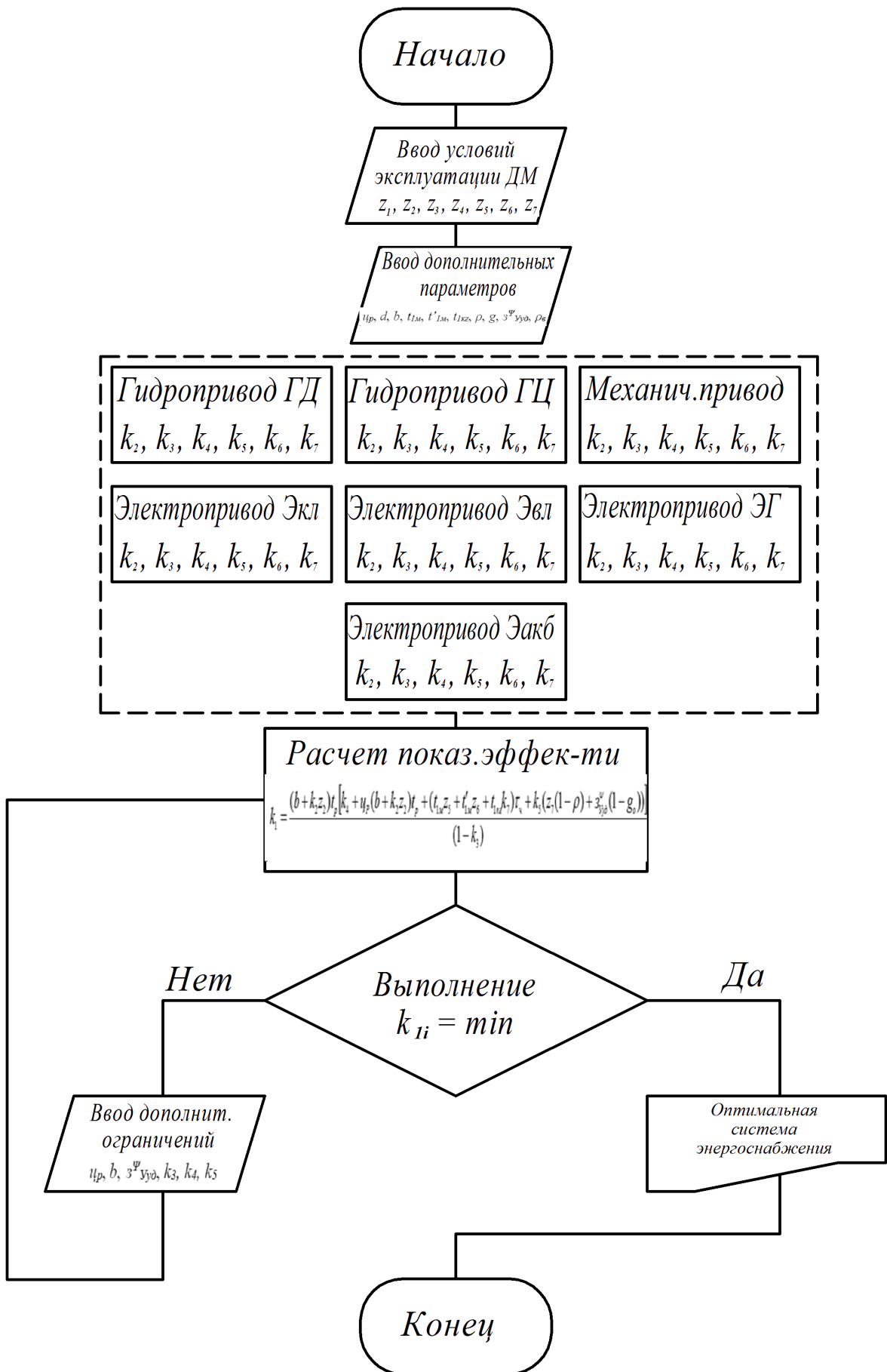
При средних объемах транспортирования $V < 500 \text{ м}^3$

$$2,5 < k_w < 200,0. \quad (\text{П2.3})$$

При объемах $V > 500 \text{ м}^3$

$$k_w > 200,0. \quad (\text{П2.4})$$

По данным практического опыта, в течение сезона на поливной участок необходимо доставлять порядка $2,5 \dots 7,0$ тыс. м^3 , что с энергетических позиций возможно выполнить только насосом. В сравнении с водовозом энергопотребление насоса в 200 и более раз ниже.



СОГЛАСОВАНО:

проректор по НИР
ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ
И.И. Воротников



« » 2018 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Наше Дело»
С.В. Ботов



2018 г.

АКТ

о внедрении законченной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы

Мы, ниже подписавшиеся, представители ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» в лице проректора по НИР Воротникова Игоря Леонидовича, научного руководителя НИР, декана факультета инженерии и природообустройства Соловьева Дмитрия Александровича и представители ООО «Наше Дело» в лице директора Ботова Сергея Васильевича, главного гидротехника Мещенкова Василия Николаевича, составили настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской работы по теме «Внедрение электрифицированных дождевальных машин кругового действия «КАСКАД» с усовершенствованными модернизированными пролетами», выполненных ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ в 2017-2018 гг. внедрены на орошаемых землях в ООО «Наше Дело» (с. Ленинское Энгельсского района Саратовской области, Гагаринская оросительная система Энгельсского филиала ФГБУ «Управление Саратовмелиоводхоз») путем непосредственного использования результатов НИР.

Основные результаты НИР:

- разработана, изготовлена и испытана новая конструкция удлиненных пролетов 65,25 м (диаметр трубы 159 мм, толщина 3 мм) для дождевальной машины «КАСКАД». Оптимизация ферменной конструкции позволяет при незначительном увеличении массы на 5,8-15,1% увеличить длину пролета на 22,1-33,8%;
- произведена разработка, изготовление, шеф-монтаж и пусконаладка двух дождевальных машин кругового действия «КАСКАД»;
- оборудование ДМ «КАСКАД» разработанными дождевателями по предлагаемым схемам расстановки обеспечило более качественное распределение слоя осадков по длине машин, позволило значительно уменьшить перепо-

Продолжение прил. Г

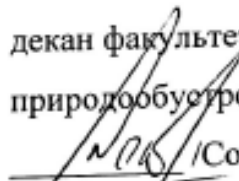
лив под первыми и последними пролетами. Средняя интенсивность дождя составила 0,53-0,55 мм/мин при диаметре его капель в пределах 0,86-0,93 мм;

- для обеспечения управления машинами ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и ДМ «КАСКАД» была разработана и внедрена автоматическая система управлением, обеспечивающая качественную работу машины со значительным количеством дополнительных опций. Для предварительного подбора режима работы машины на базе Excel разработана прикладная программа для получения графиков установки таймера для моделей ДМ «КАСКАД». На машинах внедрена система GSM контроля оборудования, предназначенная для дистанционного управления, отслеживания работы, оповещения по каналу сотовой связи о работе или отказе оборудования.

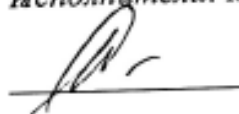
Машины хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации, эффективно работала система автоматизации и дистанционного управления. Урожайность кукурузы на поливе с использованием «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) в среднем составила 98 центнеров с гектара. В машине использованы преимущественно отечественные комплектующие (более 90%), разработанные в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ.

От ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

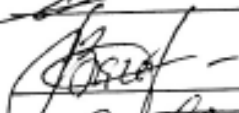
декан факультета инженерии и
природообустройства, д.т.н.

 /Соловьев Д.А. /

Исполнители: к.т.н., доценты

 /Журавлева Л.А. /

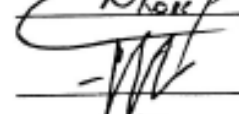
 /Левин М.А. /

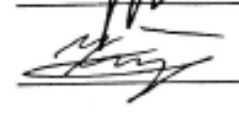
 /Загоруйко М.Г. /

 /Бакиров С.М. /

Аспиранты

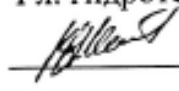
 /Колганов Д.А. /

 /Соловьев В.А. /

 /Кириченко А.В. /

От ООО «Наше дело»

Гл. гидротехник

 /Мещенков В.Н. /

Продолжение прил. Г



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

1. Наименование организации и объекта, где внедрено мероприятие (технология, машина): Учебно-научно-производственное объединение «Поволжье», с. Степное Энгельсского района Саратовской области.

2. Наименование мероприятия, по какому плану внедрялось: внедрить модернизированную широкозахватную электрифицированную дождевальную машину кругового действия КАСКАД с применением отечественных комплектующих.

3. Наименование организации, проводящей научную разработку и опытное освоение внедряемого мероприятия: кафедра «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ.

4. Срок начала внедрения мероприятий – февраль 2017 г.

Срок введения в действие ДМ КАСКАД – май-июнь 2017 г.

Срок завершения внедрения – сентябрь 2017 г.

5. Краткая характеристика и новизна внедряемого мероприятия

Модернизированная дождевальная машина КАСКАД обладает хорошим качеством полива, возможностью регулировки нормы полива в широких пределах, работает на низком давлении. В машине использовалась в течение поливного периода система дистанционного управления. В машине использовано более 90% отечественных комплектующих, включая металлоконструкцию, систему автоматизации и дистанционного управления машиной, дождеобразующие устройства дефлекторного действия, элементы привода.

Преимущества использования дождеобразующих устройств дефлекторного действия: приповерхностный полив, высокая надежность в

работе, низкая вероятность засорения. Мелкодисперсный дождь диаметром 0,4-1,0 мм снижает энергетическое воздействие на почву, уменьшая разрушения почвенных частиц и улучшая показатели достоктовой поливной нормы.

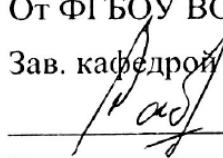
6. Основные показатели внедрения:

а) фактический объем внедрения в натуральных показателях – 1 дождевальная машина (длина 362 м);

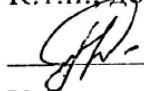
б) эффективность внедрения складывается от повышения равномерности полива, создания мелкодисперсного дождя, использования системы дистанционного мониторинга и управления, снижения вероятности засорения, внедрения отечественных комплектующих, возможности работы на низком давлении и регулировании поливной нормы. Срок окупаемости машины – в течение 2-3-х поливных сезонов (при использовании на с/х культурах – соя, кукуруза);

в) внедрение способов снижения энергопотребления: при изменении диаметра трубопровода наблюдается снижение нагрузки электропривода на 10-22 %, при изменении параметров колес наблюдается снижение нагрузки электропривода на 2-11 %.

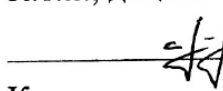
От ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ
Зав. кафедрой ТБиТТМ, д.т.н.

 /Соловьев Д.А./

К.т.н., доцент

 /Журавлева Л.А./

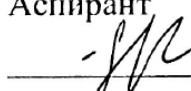
К.т.н., доцент

 /Гомберг С.В./

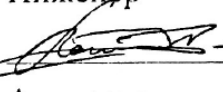
К.т.н., доцент

 /Бакиров С.М./

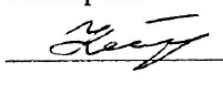
Аспирант

 /Соловьев В.А./

Инженер


 /Лонькин А.П./

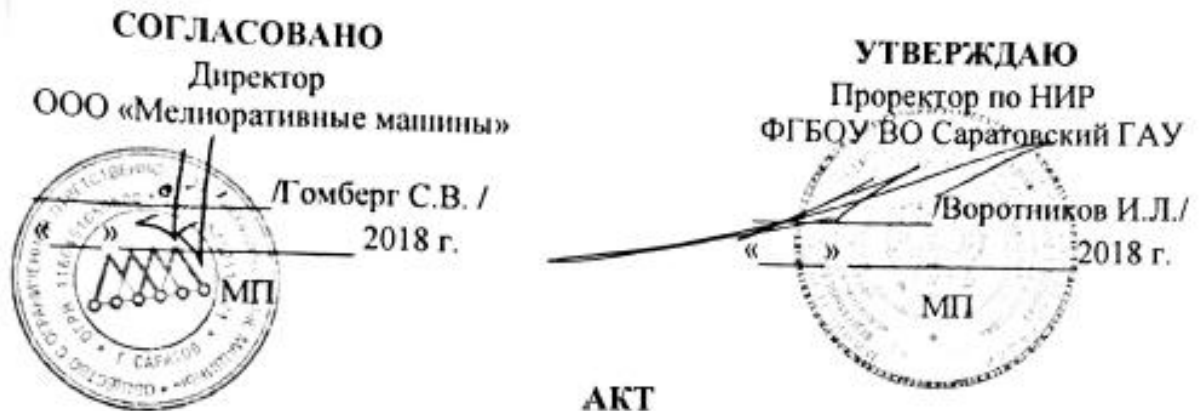
Аспирант

 /Кириченко А.В./

От УНПО «Поволжье»

Зам. начальника

 /Хадыкин А.В./



о внедрении результатов НИР

Мы, представители ООО «Мелиоративные машины», в лице директора Гомберга Сергея Владимировича и инженера Шарова Сергея Сергеевича настоящим актом подтверждаем, что результаты Научно-исследовательской работы (НИР) по внедрению электрифицированных дождевальных машин кругового действия «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и «КАСКАД» с использованием отечественных комплектующих, выполненных кафедрой «Техносферная безопасность и транспортно-технологических машин» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, внедрены в 2016-2018 гг. на орошаемых полях УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и ООО «Наше дело» (с. Ленинское Энгельского района Саратовской области). Количество внедренных машин с различными комплектациями – 5 шт.

Начало работы - февраль 2016 г.

Завершение работы: май 2018 г.

Вид внедрения результатов: разработка, изготовление, установка на орошаемых полях ООО «Наше дело» 2-х ЭДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) в 2016 году, одной дождевальной машины «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) в 2017 году и 2-х дождевальных машин «КАСКАД» в 2018 году. Проведение испытаний и научных исследований.

Область внедрения современная мелиоративная техника.

Основные результаты: дождевальные машины ЭДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и «КАСКАД» обладают хорошим качеством полива, возможностью регулировки нормы полива в широких пределах, работают на низком давлении. В машинах использовано более 90% отечественных комплектующих, включая

металлоконструкцию, систему автоматизации и дистанционного управления машиной, дождеобразующие устройства дефлекторного действия, элементы привода.

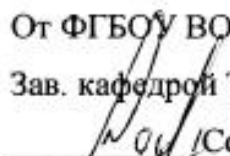
Исследования показали соответствие дождевальных машин ЭДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и «КАСКАД» требованиям действующих стандартов и рекомендованы к дальнейшему использованию на орошаемых площадях.

Технический уровень НИР создание новых дождевальных машин, патентование основных узлов и элементов конструкций (патенты на изобретение и полезную модель).


Срок окупаемости вложений в течении 2-х поливных сезонов (при использовании на с/х культурах – соя, кукуруза).

От ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

Зав. кафедрой ТБитТМ, д.т.н.

 /Соловьев Д.А. /

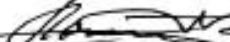
К.т.н., доценты


 /Журавлева Л.А./

 /Бакиров С.М./

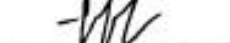
 /Левин М.А./

Инженер

 /Лонькин А.П./

 /Колганов Д.А./


Аспиранты

 /Соловьев В.А./

 /Кириченко А.В./


От ООО «Мелиоративные машины»

Инженер

 /Шаров С.С. /


От ООО «Наше дело»

гл. гидротехник

 /Мещенков В.Н./

От УНПО «Поволжье»

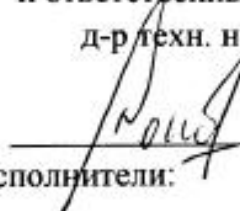
зам. начальника

 /Хадыкин А.В./

- разработаны и внедрены на базе оросительных систем Энгельсского филиала ФГБУ «Управление «Саратовмелиоводхоз» 3 дождевальных машины Кубань-ЛК1М (КАСКАД) с использованием отечественных комплектующих (две машины в ООО «Наше дело» и одна в УНПО «Поволжье»).

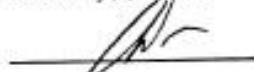
Эффективность внедрения обеспечивается повышением равномерности полива, мелкодисперсного дождевания, использования системы дистанционного мониторинга и управления, возможности работы на низких напорах и регулирования поливной нормы и др. Срок окупаемости разработок – в течение 2-3-х поливных сезонов (при использовании на с/х культурах – соя, кукуруза).

Научный руководитель
и ответственный исполнитель,
д-р техн. наук, доцент

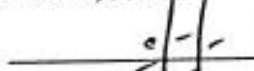
 Соловьев Д.А.

Исполнители:


К.т.н., доцент

 /Журавлева Л.А./

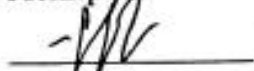
К.т.н., доцент

 /Гомберг С.В./

К.т.н., доцент

 /Бакиров С.М./

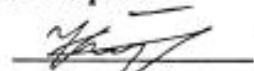
Аспирант

 /Соловьев В.А./


Инженер

 /Лонькин А.П./

Аспирант

 /Кириченко А.В./

Директор Энгельсского филиала
ФГБУ «Управление
«Саратовмелиоводхоз»

 Чуркина К.И.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Agref spol. s r.o.

Инженер Коломан Олегра

17. мая. 2019 г.

AGREF spol. s r.o.
94501 Komárno - Ďulov Dvor
Hlavná 60
IČO: 00682098, IČ DPH: SK2020399150

ВЫПИСКА

из решения международного научно-практического семинара «Мелиорация в процессе климатических изменений» 16 мая 2019 г.

ПРИСУТСТВОВАЛИ: доцент, инженер Любос Юрик, СПУ в г. Нитре; доктор естественных наук Габриэлла Иванаква, СХМУ г. Братислава; доктор естественных наук Паулина Валова, СХМУ г. Братислава; инженер Игорь Кална, предприятие «Гидромелиорация» г. Братислава; менеджер Людовит Сзабо, предприятие «Агреф» г. Комарно; кандидат технических наук, доцент Бакиров Сергей Мударисович, Саратовский государственный аграрный университет Н. И. Вавилова г. Саратов; аспирант Елисеев Сергей Сергеевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова г. Саратов; заместитель руководителя отдела внешнеэкономической деятельности ДФ ЧАО «Завод «Фрегат» Гордиенко Оксана Александровна, г. Днепр; начальник отдела продаж сельскохозяйственной техники ДФ ЧАО «Завод «Фрегат» Пославский Андрей Юрьевич, г. Днепр; завод Bauer irrigation Slovakia инженер Петер Андраш, СПУ в г.Нитра инженер Йозеф Пружински и инженер Ян Гуска, Gamaqua Комарно Жолт Жужа, Agrovária Штурово инженер Ян Пато

На основании сделанных докладов, обмена опытом и проведенной дискуссии участники конференции РЕКОМЕНДУЮТ:

Одобрить:

- выступление кандидата технических наук, доцента кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени

Продолжение прил. Г



Hlavná 60, 945 01 Komárno - Ďulov Dvor
 Tel.: +421/35/7777 500, Fax: +421/35/7731 239
 www.agref.sk, e-mail: agref@agref.sk

Н. И. Вавилова» Бакирова Сергей Мударисовича на тему «Оптимизация энергообеспечения дождевальных машин кругового действия»;

- выступление аспиранта 2-го года обучения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» Елисеева Сергея Сергеевича на тему «Применение солнечных панелей для энергообеспечения дождевальных машин кругового действия».

Председатель семинара

Людмила Сзубо


Секретарь

Хелена Бусански


Продолжение прил. Г

УТВЕРЖДАЮ

Министр сельского хозяйства
Саратовской областиТ. М. Кравцева
« 16 » 2020 г.

**ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № _____
заседания секции мелиорации научно-технического Совета
Министерства сельского хозяйства Саратовской области**

от «16» марта 2020 г.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

Тарабрин В. Н. – начальник управления растениеводства, технической политики, ГИС-технологий, мелиорации и социального обустройства села Министерства сельского хозяйства Саратовской области, руководитель секции;

Асфяндиярова А. Р. – консультант отдела мелиорации и развития сельских территорий Министерства сельского хозяйства Саратовской области, секретарь секции;

Шадских В. А. – заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации», доктор сельскохозяйственных наук, профессор;

Соловьев Д. А. – Врио ректора Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», доктор технических наук, доцент;

Абдразаков Ф. К. – заведующий кафедрой «Строительство, теплогазоснабжение и энергообеспечение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», доктор технических наук, профессор;

Афонин В. В. - заведующий кафедрой «Инженерные изыскания, природообустройство и природопользование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», кандидат сельскохозяйственных наук, доцент;

Павлов А. В. – и.о. декана факультета «Инженерии и природообустройство» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», кандидат технических наук, доцент;

Бакиров С. М. – доцент кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», кандидат технических наук, доцент;

Повестка дня:

Заслушивание и обсуждение материалов докторской диссертации кандидата технических наук, доцента Бакирова Сергея Мударисовича на тему: «Снижение энергозатрат при эксплуатации дождевальных машин кругового действия совершенствованием способов и средств энергоснабжения».

По данному вопросу выступили: Тарабрин В. Н., Шадских В. А., Абдразаков Ф. К.

Заслушав и обсудив доклад, к.т.н., доцента кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» Бакирова С. М. по теме диссертации «Снижение энергозатрат при эксплуатации дождевальных машин кругового действия совершенствованием способов и средств энергоснабжения», выступающие отмечают актуальность темы и ее практическую значимость в выборе источника энергии и в целом по энергосбережению; приняли следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что энергетические затраты ходовой части дождевальной машины существенно отличаются друг от друга в 1,6-3,8 раза. Возможный диапазон снижения энергетических затрат составляет 40-42% путем выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин, что в стоимостном виде составит экономию порядка 22348 руб. в год с одной машины, что для Саратовской области составит около 7,7 млн.руб.

2. Установлены средние показатели оптимальных систем энергоснабжения дождевальной машины при различных условиях эксплуатации:

- гидравлический привод является оптимальным при площади поливного участка $S < 40$ га, с входным давлением в трубопроводе $p > 0,45$ МПа и удаленности от водоема $l_0 < 1000$ м;

- механический привод является оптимальным при площади поливного участка $S < 6$ га, с входным давлением в трубопроводе $p < 0,30$ МПа и удаленности от населенного пункта $l_{nn} > 10000$ м и водоема $l_0 > 10000$ м;

- электрический привод является оптимальным при площади поливного участка $S > 40$ га, удаленности от водоема $l_0 > 1000$ м; при удаленности от населенного пункта $l_{nn} < 1000$ м – кабельная или воздушная линия; при

удаленности от населенного пункта $l_{ин} > 1000$ м и стоимости ресурса $c_p < 7,5$ руб./кВт*ч – аккумуляторное питание; $l_{ин} > 1000$ м и $c_p > 7,5$ руб./кВт*ч – питание от переносного генератора.

3. Установлено, что ступенчатое снижение диаметра (159 → 140 мм; 219 → 159 мм и т.п.) приводит к снижению мощности электропривода секции на 35,59-44,60% при одноступенчатом уменьшении диаметра с пропорциональностью длин 50/50 ($a = 50\%$). Также установлено, что при снижении диаметра посекционно для всей дождевальной машины на одну ступень при пропорциональности секций 50/50 ($u = 50\%$) затраты энергии снижаются на 61-63%.

4. Установлено, что выбор оптимальных параметров колес по критерию обеспечения качения и минимальной мощности электроприводов позволяет снизить мощность на 16,0-17,0% при увеличении ширины колес в 1,8 раз, также установлено выражение минимального радиуса колес, при удовлетворении которого возможно снизить потребляемую мощность на 5,1-12,4% при прочих равных условиях. Комплексное снижение мощности электропривода составит 21,1-29,4%. При сравнении жестких колес, выполненных из металла, с колесами на пневматических шинах с различными характеристиками жесткости материала, типа и слоев корда установлено что, затраты мощности электропривода на 1,25-5,87% ниже у жестких колес, при одинаковом радиусе.

5. При использовании аккумуляторного источника питания для работы секций в отдельности установлена зависимость времени работы секции с необходимым количеством тяговых аккумуляторных батарей, например, чтобы обеспечить работу секции мощностью 500 Вт на 8 часов требуется установить 6 штук ТАБ напряжением $E_1 = 12$ В с внутренним сопротивлением $r_1 = 0,002$ Ом, емкостью $C_1 = 100$ А*ч с коэффициентом максимального разряда $k_q = 0,30$ и коэффициентом временного использования тока $k_t = 0,01$.

6. Установлено, что при выборе параметров аккумуляторного способа питания (напряжение на зажимах нагрузки, емкости, схем соединения) следует учитывать продолжительность выполнения движения крайней секции в режиме непрерывного хода, когда ПВ% = 100%. Также установлено, что применение возобновляемых источников энергии для подзарядки АКБ на 15-20% с вероятностью $M(t) = 0,9$ в сутки позволит избежать затрат на ресурс в структуре общих эксплуатационных затрат если в режиме ПВ% = 100% между поливами выполнять простой для восстановления 5-7 дней, а при ПВ% = 10% - 1 день.

7. Разработаны новые технические средства, способствующие снижению затрат энергии: устройство динамической компенсации реактивной мощности позволяет снизить действие пусковых токов на источник электроэнергии и повысить КПД системы, что в результате позволит снизить затраты энергии на запуск на 44,52-78,46%, а общие

затраты энергии на 0,53-1,22%; логическая схема управления для источника в виде кабельной линии приведет к экономии затрат энергии на 1,05-4,11% за счет снижения влияния динамических режимов одновременного включения, а для источника питания в виде переносного генератора к экономии затрат на топливо на 9,21-14,85%; устройство определения угла поворота позволяет снизить затраты энергии на управление в 20 раз, что в структуре общих затрат составляет порядка 0,5-1,5%.

8. Усовершенствованы, созданы и испытаны способы снижения энергетических затрат при эксплуатации дождевальных машин кругового действия. Применение аккумуляторного источника питания определяется дополнительными капиталовложениями 296,6 тыс. руб. и годовой экономии в 85,1 тыс. руб., срок окупаемости которых составляет в среднем 3,5 года. Капиталовложения в устройство динамической компенсации реактивной мощности на один электродвигатель составят 1484,6 руб. и в течение 8 лет чистый дисконтированный доход составит 2200,23 руб., что подтверждает целесообразность использования в системе энергообеспечения дождевальных машин для энергосбережения.

ПОСТАНОВИЛИ

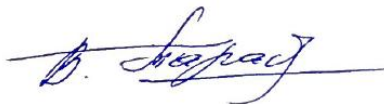
1. Считать, что материалы докторской диссертации Бакирова С. М. «Снижение энергозатрат при эксплуатации дождевальных машин кругового действия совершенствованием способов и средств энергоснабжения» представляют практическую значимость для региона и выполнены на актуальную тему.

2. Заключение по материалам докторской диссертации Бакирова С. М. утвердить.

3. Рекомендовать материалы докторской диссертации Бакирова С. М. к представлению в диссертационный совет по научным специальностям: 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве; 06.01.02 – Мелиорация, рекультивация и охрана земель.

4. Рекомендовать разработать по материалам докторской диссертации Бакирова С. М. практические рекомендации по выбору источника энергии, обслуживания системы энергоснабжения и энергосбережения при эксплуатации дождевальных машин кругового действия.

Руководитель секции

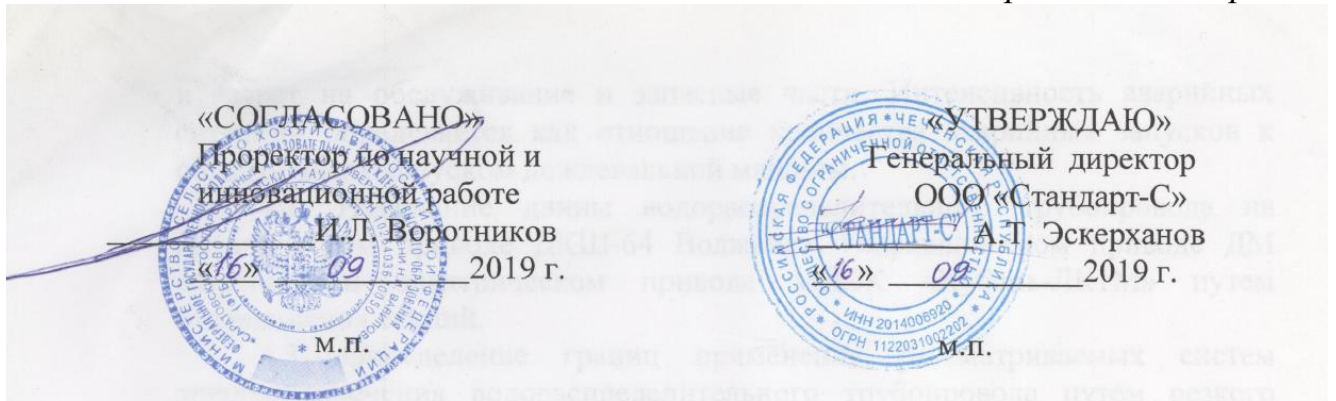


В. Н. Тарабрин

Секретарь секции



А. Р. Асфяндырова



АКТ

внедрения и реализации методики проверки параметров систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода дождевальных машин (ДКШ-64 «Волжанка», ДМ «Фрегат», МДЭК «Кубань-ЛК1М»)

1. Общие положения. Комиссия в составе специалистов: мелиоратора А.Б. Ибрагимова, главного бухгалтера М-Э. Л. Мехтиева предприятия ООО «Стандарт-С» и представителей ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» в составе руководителей Г.П. Ерошенко, Д.А. Соловьева и исполнителей С.М. Бакирова, Ш.З. Зиниева и С.С. Елисеева установила, что в период с 30 мая 2018 г. по 31 марта 2019 г. на базе предприятия ООО «Стандарт-С» проводилось внедрение и реализация методики проверки параметров систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода дождевальных машин ДКШ-64 «Волжанка», ДМ «Фрегат», МДЭК «Кубань-ЛК1М».

2. Место проведения.

Юридический адрес организации: 366605, Чеченская Республика, Ачхой-Мартановский район, Закан-Юртовская сельская администрация, ул. Бригадная, д.1.

Фактический адрес: Ачхой-Мартановский р-н, Чеченская Респ. (43°13'54.5"N 45°28'26.5"E 43.231805, 45.474032).

3. Цель проверки. Предлагаемая методика проверки параметров систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода дождевальных машин предназначена для сравнения показателей: эксплуатационных затрат Z_0 (руб.) и показателя надежности – интенсивность аварийных ситуаций λ_0 ($ч^{-1}$) на содержание дождевальных машин на механическом, гидравлическом и электрическом приводе и подтверждение границ применения систем энергообеспечения от протяженности водораспределительного трубопровода: механический привод эффективен с наилучшими показателями Z_0 (руб.) и λ_0 ($ч^{-1}$) при длине $l = 0...150$ м; гидравлический привод – при длине $l = 150...350$ м; электрический привод – при длине $l > 350$ м трубопровода.

4. Методика выполнения проверки.

4.1. Определение показателей сравнения. Эксплуатационные затраты складываются из затрат на покупку энергии для перемещения трубопровода

и затрат на обслуживание и запасные части. Интенсивность аварийных ситуаций определяется как отношение количества аварийных запусков к общему числу запуском дождевальной машины.

4.2. Изменение длины водораспределительного трубопровода на механическом приводе ДКШ-64 Волжанка, гидравлическом приводе ДМ «Фрегат» и электрическом приводе МДЭК «Кубань-ЛК1М» путем отсоединения секций.


4.3. Определение границ применения рассматриваемых систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода путем резкого изменения одного из показателей.

5. Заключение. В результате реализации методики проверки параметров систем энергообеспечения водораспределительного трубопровода дождевальных машин ДКШ-64 «Волжанка», ДМ «Фрегат», МДЭК «Кубань-ЛК1М» и полученных данных механический привод стал наиболее эффективен при длине до $l = 150$ м; гидравлический привод - при длине $l = 180$ м; электрический привод при наибольшей длине трубопровода (максимальная экспериментальная длина $l = 589$ м).

Полученные данные подтверждаются с теоретическими положениями.

От предприятия:

Мелиоратор


 Ибрагимов А. Б.

Главный бухгалтер

 Мехтиев М-Э. Л.

От университета:

Руководитель - д.т.н., профессор

 Ерошенко Г. П.

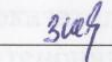
Руководитель - д.т.н.,

 Соловьев Д. А.

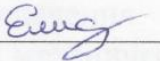
Исполнитель - к.т.н., доцент

 Бакиров С. М.

Исполнитель - к.т.н.,

 Зиниев Ш. З.

Исполнитель - аспирант

 Елисеев С. С.



Индивидуальный предприниматель
ГЛАВА КРЕСТЬЯНСКОГО (ФЕРМЕРСКОГО) ХОЗЯЙСТВА
 Вязовов Виктор Владимирович

ИНН 641200731587

ОГРНИП 304644634300110

Саратовская область, Екатериновский район, село Новоселовка



АКТ

**О ВНЕДРЕНИИ ЗАКОНЧЕННОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ,
 ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ**

Мы, ниже подписавшиеся, глава крестьянского (фермерского) хозяйства Вязовов В. В. и представители ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ доктор технических наук Соловьев Д. А., доценты Бакиров С. М., Камышова Г. Н., аспирант Елисеев С. С. составили настоящий акт о том, что в условиях сельскохозяйственного предприятия ИП Глава К(Ф)Х Вязовов В. В. внедрены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Повышение энергетической эффективности дождевальных машин кругового действия обоснованием способов и средств энергосбережения», выполненных в ФГБОУ ВО Саратовском ГАУ. В результате проведенной законченной работы получены следующие научно-технические результаты:

1. Рекомендации по применению алгоритма и программы выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия в различных условиях эксплуатации.

2. Технические и технологические способы повышения энергетической эффективности дождевальных машин кругового действия путем изменения диаметра трубопровода, параметров движителей опорных тележек; совершенствования аккумуляторного источника питания; разработки устройств динамической компенсации реактивной мощности для электродвигателей переменного тока, определения угла поворота секции;

схемы логического управления движением; адаптивной системы управления потребляемой мощности электроприводами опорных тележек, которые в совокупности позволяют снизить энергопотребление дождевальная машины на 28,3-39,8 %.

3. Ожидаемый экономический эффект от внедрения способов и средств энергосбережения составит около 2 млн. руб.



От предприятия:
ИП Глава К(Ф)Х

Вязовов В. В.

От университета:

Руководитель – Врио ректора д.т.н.,
доцент

Соловьев Д. А.

Исполнитель – к.т.н., доцент

Бакиров С.М.

Исполнитель – к.ф.-м.н., доцент

Камышова Г. Н.

Исполнитель – аспирант

Елисеев С. С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «НАШЕ ДЕЛО»

С. В. Ботов

«22» июля 2020 г.

**АКТ****производственных испытаний дождевальных машин
кругового действия**

Комиссия в составе представителя ООО «НАШЕ ДЕЛО»: инженера по эксплуатации мелиоративных систем Мещенкова В. Н. и представителей ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова»: Врио ректора, доктора технических наук, доцента Соловьева Д. А., кандидатов технических наук, доцентов Бакирова С. М., Левина М. А., кандидата физико-математических наук, доцента Камышовой Г. Н., аспиранта Елисеева С. С. составила настоящий акт на производственные испытания 75 единиц дождевальных машин кругового действия, эксплуатируемых в различных условиях для выбора оптимальной системы энергоснабжения по критерию наименьшего энергопотребления.

Испытания проводились в период с 19 июля 2018 по 21 июля 2020 г. на 42 единицах дождевальных машин в Энгельсском районе и 33 единицах дождевальных машин в Марксовском районе Саратовской области.

В ходе проведения производственных испытаний получены следующие результаты:


- 24 единицы дождевальных машин кругового действия эксплуатируются с завышенным энергопотреблением на 17...42 %;
- разработаны рекомендации по оснащению оптимальными системами энергоснабжения для энергозатратных дождевальных машин;

- ожидаемый эффект от применения оптимальных систем энергоснабжения дождевальных машин кругового действия оценивается в диапазоне 20-40% снижения энергопотребления;

- прогнозируемый экономический эффект составит около 1,5 млн. рублей в год со сроком окупаемости менее 3 лет при дополнительных капитальных вложениях 3,6 млн. рублей.

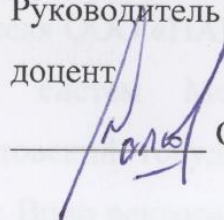
От предприятия:

Инженер по эксплуатации
мелиоративных систем

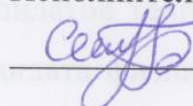

В. Н. Мещенков

От университета:

Руководитель – Врио ректора д.т.н.,
доцент


Соловьев Д. А.

Исполнитель – к.т.н., доцент


Бакиров С.М.

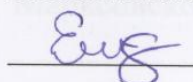
Исполнитель – к.т.н., доцент


Левин М.А.

Исполнитель – к.ф.-м.н., доцент


Камышова Г. Н.

Исполнитель – аспирант


Елисеев С. С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «НАШЕ ДЕЛО»

С. В. Ботов

«14» августа 2020 г.

**АКТ****производственных испытаний дождевальная машины кругового действия на аккумуляторном источнике питания**

Комиссия в составе представителя ООО «НАШЕ ДЕЛО» инженера по эксплуатации мелиоративных систем Мещенкова В. Н. и представителей ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ: руководителя - Врио ректора Соловьева Д. А. и исполнителей доцентов Бакирова С. М., Камышовой Г. Н., аспиранта Елисеева С. С. составила настоящий акт на производственные испытания дождевальная машины кругового действия на аккумуляторном источнике питания, разработанной в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ доцентами С. М. Бакировым, Г. Н. Камышовой и аспирантом Елисеевым С. С. на основании результатов научного исследования обеспечения требуемой продолжительности движения дождевальная машины на аккумуляторном источнике питания с использованием солнечных батарей.

Испытания проводились в период с 19 июля 2020 по 18 августа 2020 г.

Производственная проверка дождевальная машины кругового действия на аккумуляторном источнике питания с использованием солнечных батарей показала работоспособность и надежность движения в полевых условиях, а также высокую энергетическую эффективность машины.

В результате получено:

1. Продолжительность работы дождевальная машины на аккумуляторном источнике питания соответствует данным научной работы и на 1,0–12,0 % больше обеспечивает последовательное соединение стандартных тяговых аккумуляторных батарей.


2. Использование солнечных батарей для заряда аккумуляторов исключает потребность в дополнительном источнике питания и исключает затраты на электроэнергию, требуемую на движение дождевальной машины.

3. Подтверждено, что в режиме работы электропривода опорной тележки крайней секции ДМ ПВ% = 100 % для полного заряда АКБ потребуется 5 дней, а при ПВ% = 10 % – 1 день.

4. Ожидаемый экономический эффект внедрения аккумуляторного источника питания с использованием солнечных батарей составит ориентировочно 1,6 млн. руб. в год на 20 единиц дождевальных машин кругового действия.

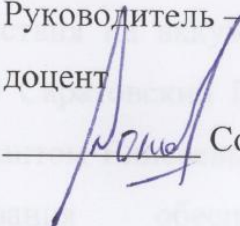
От предприятия:

Инженер по эксплуатации
мелиоративных систем

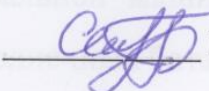
 В. Н. Мещенков

От университета:


Руководитель – Врио ректора д.т.н.,
доцент

 Соловьев Д. А.


Исполнитель – к.т.н., доцент

 Бакиров С.М.

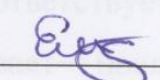
Исполнитель – к.т.н., доцент

 Левин М.А.

Исполнитель – к.ф.-м.н., доцент

 Камышова Г. Н.

Исполнитель – аспирант

 Елисеев С. С.



АКТ

внедрения и реализация программы поиска оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин кругового действия предприятия на основе структуры энергопотребления

1. Общие положения. Комиссия в составе специалистов: ведущего инженера по эксплуатации систем орошения В. В. Рубанова, исполнительного директора Кутового Д. В. предприятия ООО «АПК» Райгород» и представителей ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им Н.И. Вавилова» в составе руководителя Д. А. Соловьева и исполнителей С. М. Бакирова, М. А. Левина, и С. С. Елисеева установила, что в период с 01.08.2018 г. по 01.11.2019 г. на базе предприятия ООО «АПК» Райгород» (Волгоградская область) проводилось внедрение и реализация программы поиска наилучшей системы энергообеспечения и обработке данных о структуре энергопотребления ресурсов дождевальных машин кругового действия с электрическим приводом Valley – 18 шт.

2. Место проведения.

Юридический адрес организации: 404173, РФ, Волгоградская область, Светлоярский район, село Райгород, ул. Промышленная, д. 1.

Фактический адрес: 404173, РФ, Волгоградская область, Светлоярский район, село Райгород, ул. Промышленная, д. 1.

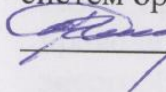
3. Цель проверки. Предлагаемый алгоритм и программа поиска эффективной системы энергообеспечения ходовой части дождевальных машин относительно показателя энергопотребления на основе агротехнических данных и типа привода ходовой части (гидравлический, механический, электрический). В качестве сравнительных показателей принимаются: показатели удельной мощности k_2 , показатели коэффициента полезного действия k_3 , показатели стоимостей комплектов приводов k_4 , показатели надежности комплектов приводов k_5 , показатели массы комплектов приводов k_7 , поливная норма z_1 , площадь поливного участка z_2 , давления потока жидкости на входе в дождевальную машину z_4 , удаленностей от централизованного энергоснабжения z_5 и водоема z_6 , прироста прибыли от полива z_7 , диаметры трубопроводов d , стоимости ресурса $ц_p$, трудоемкости работ $t_{1м}, t'_{1м}, t_{1к2}$; плотности поливной воды ρ_0 .

| Показатели дождевальных машин | | Исследуемые дождевальные машины предприятия | | | | | | | | |
|--|---------------------|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Обозначение | Ед-ца измерения | Valley №1-2 | Valley №3-5 | Valley №6 | Valley №7-9 | Valley №10-11 | Valley №12 | Valley №13-14 | Valley №15-16 | Valley №17-18 |
| $V_{кр}$ | млн.руб. * кВт*ч | 6,17 | 6,23 | 8,93 | 6,39 | 7,12 | 8,03 | 7,11 | 7,65 | 7,31 |
| Соответствие эффективной системе энергообеспечения | | Соотв. | Соотв. | Не соотв. | Соотв. | Соотв. | Не соотв. | Соотв. | Соотв. | Соотв. |
| Наилучшая система энергообеспечения в агротехнических условиях | | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с с аккумулятор. питанием | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с кабельной линией | Электропривод с кабельной линией |

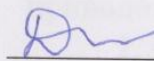
Полученные данные подтверждаются с теоретическими положениями.

От предприятия:

Ведущий инженер по эксплуатации
систем орошения

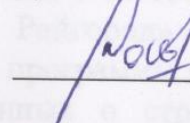
 В.В. Рубанов

Исполнительный директор

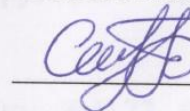
 Д.В. Кутовой

От университета:

Руководитель - д.т.н., доцент

 Соловьев Д. А.

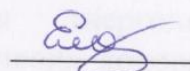
Исполнитель - к.т.н., доцент

 Бакиров С.М.

Исполнитель - к.т.н., доцент

 Левин М. А.

Исполнитель - аспирант

 Елисеев С. С.

«СОГЛАСОВАНО»

И.о. проректора по научной
и инновационной работе

И. Д. Воронцов

«19» октября 2020 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ООО «Мелиоративные машины»

С. В. Гомберг

«19» октября 2020 г.



М.П.

АКТ

**о внедрении законченной научно-исследовательской
и опытно-конструкторской работы**

Мы, ниже подписавшиеся, представитель ООО «Мелиоративные машины» директор С. В. Гомберг и представители ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им Н.И. Вавилова»: доктора технических наук, доцента Д. А. Соловьев, кандидаты технических наук, доценты С. М. Бакиров, М. А. Левин, кандидат физико-математических наук, доцент Г. Н. Камышова и аспирант С. С. Елисеев составили настоящий акт о том, что в период с 01.08.2018 г. по 18.10.2020 г. проведена научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа на тему «Повышение энергетической эффективности дождевальных машин круговых электрифицированных «КАСКАД» за счет разработки и внедрения способов и средств энергосбережения» в полном объеме.

Работа выполнена по следующим направлениям:

- влияние изменения диаметра водораспределительного трубопровода для одной секции длиной 59,5 м и дождевальной машины в целом длиной 357 м на потребление энергии;

- влияние изменения колес (жестких и на пневматических шинах) опорных тележек для одной секции и дождевальной машины в целом на энергопотребление;
- влияние устройств динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, определения пространственного положения секции, схем управления движением дождевальной машины на энергопотребление.

Эффективность предложенных способов и средств энергосбережения в дождевальных машинах подтверждается снижением энергопотребления на 20–40%, а ожидаемый экономический эффект оценивается в 1,1–1,3 млн. руб.

От предприятия:
Директор



С. В. Гомберг

От университета:
Руководитель д.т.н., доцент

Соловьев Д. А.

Исполнители – к.т.н., доцент

Бакиров С.М.

К.т.н., доцент

Левин М. А.

К.ф.-м.н., доцент

Камышова Г. Н.

Аспирант

Елисеев С. С.

Работа выполнена по следующему направлению:

- влияние изменения диаметра подпроектируемого трубопровода для одной секции длиной 59,5 м и дождевальной машины в целом длиной 357 м на потребление энергии;