

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет
имени Н.И. Вавилова»

На правах рукописи

Верзилин Андрей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ОБОСНОВАНИЕМ
АЛГОРИТМОВ ИХ НАГРУЖЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМИ
АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ СЕЛЬХОЗМАШИН**

Специальность: 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Глухарев Владимир Алексеевич

Саратов 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Обзор сельскохозяйственного оборудования с электродвигательной нагрузкой.....	13
1.2 Характеристики ЭГУ с поршневыми ДВС	20
1.3 Выбор мощности ЭГУ для питания электродвигательной нагрузки	25
1.4 Определение устойчивости системы ЭГУ и электродвигательной нагрузки.....	33
Выводы и постановка цели и задач исследования.....	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ МОЩНОСТИ ЭГУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ	41
2.1 Условия выбора мощности генератора с приводом от двигателя внутреннего сгорания.....	41
2.2 Влияние порядка запуска электродвигателя в технологическом процессе на требуемую мощность источника соизмеримой мощности.....	44
2.3 Определение соизмеримости мощности ЭГУ с мощностью узла двигательной нагрузки.....	50
2.4 Учет влияния переходных процессов при пуске асинхронных электродвигателей от источника соизмеримой мощности.....	53
2.5 Методика выбора требуемой мощности генератора для автономного электроснабжения.....	58
Выводы по главе.....	68
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.....	70
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	70
3.2 Методика и технические средства эксперимента.....	71
3.3 Разработка логической схемы управления для программирования логического контроллера	76
3.4 Объект натурального исследования.....	81
3.5 Методика обработки статистических данных.....	88
Выводы по главе.....	92

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И НАТУРНОГО ИССЛЕДОВАНИЙ	93
4.1 Результаты экспериментальных исследований	93
4.2 Результаты натурального исследования	101
Выводы по главе	108
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВЫБОРУ МОЩНОСТИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.....	109
5.1 Результаты расчета капитальных вложений	109
5.2 Расчет эксплуатационных издержек	110
5.3 Оценка экономической эффективности капитальных затрат	111
Выводы по главе	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЯ	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности технологических процессов на предприятиях сельхозпроизводства является необходимым условием устойчивого функционирования и поступательного развития сельскохозяйственной отрасли. Последовательное решение задач, посвященных этому направлению, требует, как правило, учета влияния фактора сезонности использования технологических установок в характерных операциях и процессах – орошении пахотных земель, сушке, очистке, сортировке, погрузке, хранении зерна и др.

Среди более 1,5 тысяч сельхозпредприятий Саратовской области, занимающихся производством, переработкой и хранением сельхозпродукции, далеко не всем удастся обеспечить энергоснабжение подобных объектов, оборудования или технологий от стационарных источников питания или распределительных электрических сетей. При этом в качестве неизбежной альтернативы одна треть таких предприятий вынуждены применять для этих целей доступные и хорошо зарекомендовавшие себя на практике передвижные автономные электрогенераторные установки (ЭГУ) относительно небольшой (до 45 кВт·А) мощности.

По статистике, в среднем из продаваемых ежегодно более чем 20 тыс. ЭГУ, около 70 % приходится на установки мощностью до 75 кВт·А. Каждую приобретаемую ЭГУ выбирают по мощности подключаемой нагрузки. Основными потребителями электрогенераторных установок на сельхозпредприятиях являются электрифицированные передвижные машины и технологические установки, которые оснащены, как правило, многодвигательными (2–4 и более) асинхронными электроприводами переменного тока и представляют собой сосредоточенную нагрузку с явно выраженным графиком энергопотребления. При этом для электроснабжения

каждой второй электрифицированной дождевальная машины используются именно ЭГУ.

Однако применение ЭГУ повышает многоступенчатость процесса, усложняет систему, удорожает как технологию, так и готовую продукцию по сравнению с энергоснабжением от стационарной электрической сети. Неотъемлемым фактором этого удорожания при выборе электрогенераторной установки выступает необходимость обязательного превышения номинальной мощности генератора ЭГУ над суммарной мощностью подключаемого технологического оборудования, обеспечивающей требуемые пусковые и установившиеся режимы многодвигательного электропривода рабочей машины с прямым включением асинхронных двигателей.

Существующие в настоящее время подходы и методы оценки, определения и выбора мощности ЭГУ для питания многодвигательных асинхронных электроприводов, в том числе передвижных машин и установок сельхозпроизводства, как правило, обобщенно учитывают одновременно необходимые пусковой (для наибольшего по мощности) и установившиеся (для остальных) режимы электродвигателей рабочей машины. Определяемый таким образом запас мощности выбираемой ЭГУ, как правило, избыточен. При этом достигнутое обеспечение необходимого электрического режима и характеристик двигателей электропривода рабочей машины сопровождается ухудшением показателей энергоэффективности ЭГУ и всей энергопотребляющей системы (например, возрастает удельный расход топлива ДВС ЭГУ на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии, увеличиваются вредные выбросы недогруженного теплового двигателя установки и др.).

Существенное противоречие представленного подхода состоит в том, что традиционные методы дают возможность определять для многодвигательных асинхронных электроприводов переменного тока гарантированный запас мощности с избытком, однако не позволяют при необходимости учесть и ввести в расчет дополнительные условия, которые обеспечивают минимизацию этого

запаса мощности ЭГУ без ухудшения характеристик электропривода при повышении показателей энергоэффективности электрогенераторной установки или системы «ЭГУ – энергопотребляющая машина». Преодоление этого противоречия, нацеленное на повышение показателей энергоэффективности электрогенераторных установок, применяемых для автономного электропитания передвижных сельхозмашин и достижение энергосбережения в операциях и процессах сельхозпредприятий, является актуальной научно-практической задачей. Плодотворным направлением её решения представляется такое определение потребной мощности ЭГУ, в котором учитываются условия соизмеримости мощностей собственно генератора и отдельных электродвигателей и дополнительно оптимизируется последовательность подключения двигателей электропривода к ЭГУ, что обеспечивает повышение показателей энергоэффективности системы.

Работа выполнена в соответствии с приоритетным научным направлением ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795).

Степень разработанности темы. Исследованиями в области автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей занимались такие ученые, как И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, А.К. Михайлов, В.С. Богачев, С.М. Воронин, Э.В. Магадеев, С.Ф. Степанов, М.В. Шелубаев и др. Вопросы эффективности работы электропривода и питания от генератора соизмеримой мощности изучали И.А. Сыромятников, А.П. Фоменков и Г.А. Мелешкин, В.А. Носков, Л.А. Пантелеева и др. Однако несмотря на многочисленность исследований в области автономного электроснабжения, задача улучшения энергоэффективности при определении требуемой мощности электрогенераторной установки для автономного электроснабжения многодвигательных асинхронных электроприводов сельскохозяйственных потребителей, в том числе передвижных сельхозмашин, остается актуальной.

Цель работы – повышение энергетической эффективности электрогенераторной установки при питании многодвигательных электроприводов обоснованием соотношения запаса мощности ЭГУ с очередностью запуска электродвигателей.

Задачи исследования:

- выполнить анализ использования ЭГУ для автономного питания технологических процессов и состава сосредоточенной электродвигательной нагрузки различного сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве);
- теоретически определить влияние последовательности запуска асинхронных электродвигателей в технологическом процессе передвижной установки на допустимое соотношение мощностей в системе «ЭГУ – многодвигательный электропривод»;
- разработать порядок определения и выбора мощности автономного источника питания – ЭГУ для электроснабжения сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой;
- экспериментально подтвердить влияние обоснованного порядка запуска асинхронных электродвигателей в технологическом процессе на устойчивость электрического режима и улучшение показателей энергоэффективности ЭГУ;
- определить экономическую эффективность применения автономного источника питания – ЭГУ, выбранного на основании предложенного расчета.

Объект исследования – система электроснабжения сельскохозяйственного энергопотребляющего оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) от автономного источника питания – ЭГУ.

Предмет исследования – зависимости мощности и электрических характеристик автономного источника питания – ЭГУ от величины и очередности

включения электроприводов в системе электроснабжения сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- определении зависимости требуемой мощности ЭГУ от очередности запуска и мощности электродвигателей в технологическом процессе;
- разработке порядка расчета и выбора мощности ЭГУ для электроснабжения сосредоточенной электродвигательной нагрузки;
- использовании при определении загрузки ЭГУ предложенного коэффициента соизмеримости.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- обосновано влияние очередности запуска электродвигателей в технологическом процессе на требуемую мощность ЭГУ;
- предложен способ определения мощности ЭГУ для электроснабжения многодвигательной сосредоточенной нагрузки с заданным или изменяемым порядком запуска с помощью разработанного порядка расчета и номограммы;
- определены значения коэффициента соизмеримости позволяющие оценить эффективность загрузки ЭГУ;
- применение автономного источника питания – ЭГУ, выбранного на основании предложенного расчета, позволяет снизить капиталовложения и эксплуатационные затраты на автономное электроснабжение технологических процессов сельскохозяйственного производства.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, базирующиеся на теории электрических машин, теоретических основах электротехники. В экспериментальных исследованиях и при обработке результатов применены методы математического анализа. Результаты исследований приведены в разработанной методике рас-

чета мощности ЭГУ для автономного электроснабжения многодвигательной сосредоточенной нагрузки, позволяющие повысить эффективность автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. При испытаниях применены современные средства измерительной техники.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретические исследования зависимости требуемой мощности ЭГУ от мощности и очередности запуска электродвигателей в технологическом процессе производства;
- разработанный порядок расчета и выбора мощности ЭГУ для электроснабжения сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой;
- значения коэффициента соизмеримости, применяемые для оценки эффективности загрузки ЭГУ.

Степень достоверности и апробация результатов исследования подтверждены достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, полученных в производственных условиях.

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены, обсуждены и получили положительную оценку:

- на конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов по итогам научно-исследовательской, учебно-методической и воспитательной работы Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова (г. Саратов, 2014–2020 гг.);
- на конференциях «Разработки молодых ученых в области повышения энергоэффективности использования топливно-энергетических ресурсов» в рамках XV–XVII специализированных выставок с международным участием «Энергетика. Энергоэффективность» (г. Саратов, 2014–2015 гг.);
- на Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2015–2016; 2021 гг.);
- на Международной научно-практической конференции «Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований» (Казань, 2017 г.);

- на Международной научно-практической конференции «Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении» (Саратов, 2017 г.);

- на Международной научно-практической конференции «Современные технологии в мировом научном пространстве» (Пермь, 2017 г.).

По результатам исследования опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 в рецензируемых научных изданиях, 1 работа в издании, включенном в базу Web of Science. Общий объем публикаций 3,1 печ. л., из которых 1,2 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 в рецензируемых научных изданиях, 1 работа – в издании, включенном в базу Web of Science. Общий объем публикаций 3,1 печ. л., из которых 1,1 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 129 страницах компьютерного текста, содержит 38 рисунков, 23 таблицы и 6 приложений. Список использованной литературы включает в себя 108 наименований, в том числе 9 – на иностранном языке.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сельское хозяйство является одним из приоритетных направлений социально-экономического развития России. «Стратегия устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года» предусматривает создание в сельской местности благоприятных инфраструктурных условий и высокотехнологичных рабочих мест, увеличение производительности труда за счет улучшения энергообеспечения [5, 14, 20, 23, 60, 76, 77].

Интенсивное развитие промышленности, совершенствование технологий в сфере производства и передачи электроэнергии, государственное планирование привели к тому, что в России исторически сложилась централизованная система энергоснабжения. В больших масштабах централизованные генерирующие станции производят электроэнергию и передают ее по всей территории РФ посредством распределительных сетей среднего или низкого напряжения. В централизованной системе потребитель играет подчиненную роль. У потребителя отсутствует возможность влиять на тариф, он несет потери в случае отключения энергии, оплачивает завышенные тарифы на производство и передачу электроэнергии [17, 51, 52, 55, 102, 107].

В основном сельскохозяйственные потребители удалены от крупных энергетических центров, что приводит к возникновению технико-экономических трудностей в обеспечении надежности эксплуатации существующих систем электроснабжения. Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем является актуальной научно-практической задачей [5, 8, 25, 34, 40, 56, 58, 72, 85, 86].

В этом случае целесообразны переход от электроснабжения сельскохозяйственных предприятий к электроснабжению технологических процессов и

уход от централизованного электроснабжения к распределенной энергетике с сохранением качества электроснабжения [15, 100, 102].

Одним из способов совершенствования энергообеспечения в агропромышленном комплексе является построение локальных систем энергообеспечения, в рамках которых могут решаться задачи автономного электроснабжения как сельскохозяйственных предприятий в целом, так и технологических процессов в отдельности [2, 3].

Сельскохозяйственные производственные потребители (СХП) по видам деятельности, отраслям, установленной мощности и характеру нагрузок подразделяются на классы (рисунок 1.1) [92].

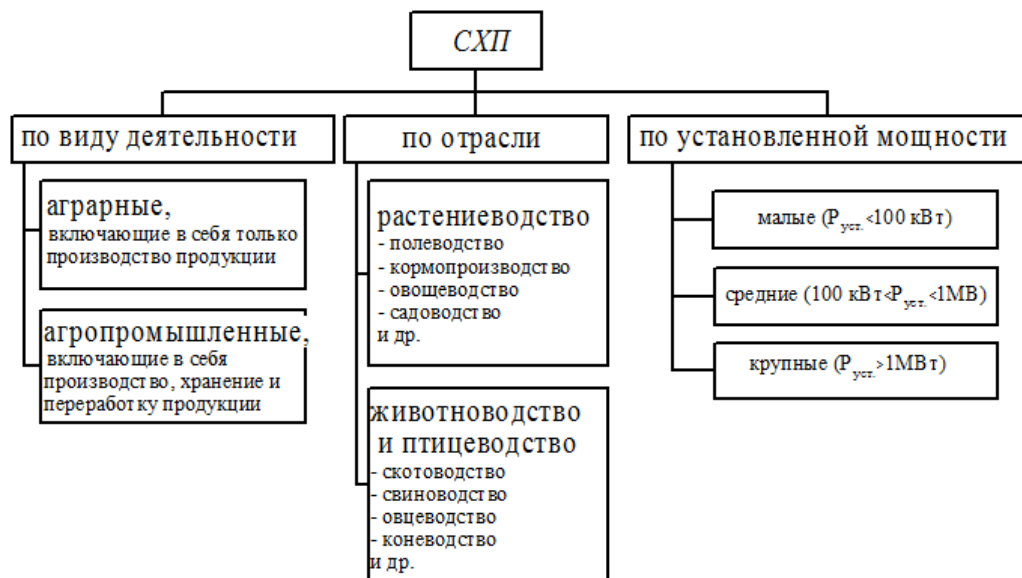


Рисунок 1.1 – Классификация СХП

Для сельскохозяйственного производства характерна сезонность многих технологических процессов, а это обуславливает неравномерно загруженный график работы оборудования и неравномерный характер электропотребления в течение суток, месяца, сезона и года в целом [12, 15, 17, 84].

Для обеспечения энергоснабжения некоторых сезонных технологических процессов (таких, как орошение, а именно полив дождеванием с применением дождевальной техники, послеуборочная обработка зерна, погрузка и т. д.), удаленных от стационарных источников питания или распределитель-

ных электрических сетей применяют доступные и хорошо зарекомендовавшие себя на практике передвижные автономные электрогенераторные установки (ЭГУ) относительно небольшой (до 45 кВт·А) мощности.

Можно предположить, что в связи с удаленностью от энергетических центров и потребностью сельскохозяйственных потребителей в электропотреблении только в периоды сезонных работ увеличивается необходимость применения электрогенераторных установок. В подтверждение данной тенденции можно привести анализ статистики продаж ЭГУ: ежегодно в среднем продается более 20 тыс. ЭГУ, из них около 70 % приходится на мощности до 75кВт·А.

1.1 Обзор сельскохозяйственного оборудования с электродвигательной нагрузкой

Электропривод применяемый в с/х производстве во многом определяет техническую основу механизации и автоматизации производственных процессов. Его широко применяют как в растениеводстве, так и в животноводстве для привода исполнительных механизмов, приготовления кормов, водоснабжения, доения коров, стрижки овец, вентиляции животноводческих помещений, а также на зернотоках, в ремонтных мастерских и т. д.

Электропривод разделяют на три типа:

групповой – от одного электродвигателя с помощью одной или нескольких трансмиссий движение передается группе рабочих машин;

одиочный – от одного отдельного электродвигателя приводится в движение один производственный механизм;

многодвигательный – для привода рабочих механизмов одной рабочей машины используют отдельные электродвигатели (например, очиститель вороха самоходный ОВС-25А, зерноочистительная машина ЗВС-20, дождевальные машины и др.).

Сезонность технологических процессов в сельском хозяйстве предусматривает работу технологического оборудования в периоды, когда это требуется технологией, например послеуборочная обработка зерна с использованием зерноочистительных машин. В настоящее время большую роль в послеуборочной обработке зерна играют машины с многодвигательным электроприводом, такие, как ЗВС-20, ОВС-25А, ЗС-90, ПЗК-30-150, СПСМ-10 и др. (рисунок 1.2).

*а**б**в**г*

Рисунок 1.2 – Сельскохозяйственные машины:
а – передвижной зерноочистительный комплекс ПЗК-30;
б – очиститель вороха самоходный ОВС-25; *в* – транспортер шнековый ТШ-150;
г – зернометатель самопередвижной ЗС-90

С точки зрения электроснабжения машины представляют собой узел с многодвигательным электроприводом. Из таблицы 1.1 видно, что в большинстве машин установлено от 1 до 5 электродвигателей мощностью от 0,37 до 15 кВт. Установленная мощность машины может состоять из мощности как одного электропривода, так и нескольких.

**Таблица 1.1– Параметры электроприводов машин
первичной обработки зерна и зернопогрузчиков**

Марка рабочей машины	Установленная мощность, кВт	Количество электроприводов, шт.	Параметры электропривода отдельных органов рабочей машины	
			380 В	кВт
ТШ-150	2,2	1	380 В	2,2 кВт
ТШ-300	5,5	1	380 В	5,5 кВт
ТЛТ-3514-Э	15	1	380 В	15 кВт
ЗВС-20	7,7	2	380 В	2,2 кВт
				5,5 кВт
ЗМ-60	10,5	2	380 В	3 кВт
				7,5 кВт
ЗС-90	6,55	3	380 В	3 кВт
				3 кВт
				0,55 кВт
ЗС-90МР-1-Ч	10	3	380 В	4 кВт
				5,5 кВт
				0,55 кВт
СПСМ-10	4,62	4	380 В	0,37 кВт
				1,5кВт
				2,2 кВт
				0,55 кВт
ОВС-25	9,5	4	380 В	4 кВт
				2,2 кВт
				2,2 кВт
				1,1 кВт
ПЗК-30	15,55	5	380 В	0,55 кВт
				4 кВт
				3 кВт
				4 кВт
				4 кВт
ПЗК-60	16,55	5	380 В	0,55 кВт
				4 кВт
				4 кВт
				4 кВт
				4 кВт
ПЗК-100	18,05	5	380 В	0,55 кВт
				4 кВт
				4 кВт
				4 кВт
				5,5 кВт
ПЗК-150	21,55	5	380 В	0,55 кВт
				5,5 кВт
				4 кВт
				4 кВт
				7,5 кВт

Большое значение в повышении эффективности пахотных земель занимает орошение. Функционирование мелиоративных систем связано с использованием водонапорных станций и дождевальных машин (рисунок 1.3).

*а**б*

Рисунок 1.3 – Дождевальные машины (внешний вид):
а – МДЭК «Каскад»; *б* – Bauer

Как показывают последние исследования [37, 99], вырос спрос на электрифицированные дождевальные машины. Это можно объяснить тем, что с помощью современных технических средств, работающих от электроэнергии, появилась возможность дистанционного управления поливом с помощью дождевальных машин. В настоящее время выпускаемые машины имеют множество модификаций по принципу управления, движения, конструкции и т. п. [7, 37, 99].

Большинство дождевальных машин (52 %) имеют электрический привод и управление. Некоторые технико-экономические параметры современных ДМ кругового действия представлены в таблице 1.2.

Источниками для электроснабжения дождевальных машин могут быть кабельная линия, передвижная электрогенераторная установка с дизельным или бензиновый двигателем внутреннего сгорания (рисунок 1.4), аккумулятор с зарядом от кабельной линии, аккумулятор с зарядом от солнечных батарей.

Таблица 1.2 – Технико-экономические параметры современных ДМКД
с электроприводом

Марка ДМКД	Тип привода	Стоимость оборудования, тыс. руб./м	Установленная мощность (max), кВт	Количество тележек, шт.	Параметры привода одной тележки	Кол-во электродвигателей, шт.	Длина машины (max), м
Вауер (Австрия)	электрический	12,5	12,4	4...12	380 В; 0,55 кВт	4...12	525
ДМЭ «Фрегат» (Украина)	электрический	10,0	12,5	4...10	380 В; 0,55 кВт	4...10	525
«Каскад» (Россия)	электрический	9,5	10,0	4...10	380 В; 0,55 кВт	4...10	675
Zimatic (США)	электрический	12,8	10,0	4...10	380 В; 0,55 кВт	4...10	525
RKD (Испания)	электрический	12,0	10,0	4...10	380 В; 0,55 кВт	4...10	525



Рисунок 1.4 – Электрогенераторная установка AD10-T400 для электроснабжения дождевальной машины

Продолжительность работы дождевальной техники за сезон колеблется от 300 до 500 ч. В межсезонный период элементы системы энергоснабжения дождевальных машин консервируют. В электрифицированных машинах консервации подлежат электродвигатели, провода и кабели, щит управления и источник энергии [7, 37].

Разница энергопотребления одной и той же машины определяется видом источника электроснабжения. Централизованная сеть электроснабжения имеет существенно больший запас мощности. Очевидно, что кабельная линия обеспечивает электроэнергией в том количестве, которое необходимо системе. Энергопотребление системы энергоснабжения дождевальных машин с кабельной линией в 2,7 раза меньше, чем системы с ЭГУ. Электрогенераторная установка может работать на холостом ходу в недогруженном режиме, тем самым снижая эффективность использования ЭГУ.

Для электроснабжения электрифицированных дождевальных машин в 50 % случаях используют ЭГУ.

Варианты электроснабжения дождевальных машин имеют различные уровни потребления топливно-энергетических ресурсов. По предварительной оценке, это связано с видом преобразования энергии на различных этапах работы системы энергоснабжения дождевальных машин, а также с условиями эксплуатации. Повышение эффективности работы ЭГУ на электродвигательную нагрузку является актуальной задачей в настоящее время.

Применение ЭГУ в сельскохозяйственной отрасли носит не новый характер. С их помощью осуществляют электроснабжение технологических процессов летних доек, выездной пасеки, а также обеспечивают выполнение ремонтных или строительных работ с помощью электроинструмента [1, 2, 48, 49].

В электроприводах сельскохозяйственного назначения обычно применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора. Стоит отметить, что до 60 % всей потребляемой сельским хозяйством электроэнергии приходится на использование асинхронных электроприводов. Наибольшее распространение получили двигатели мощностью от 1 до 11 кВт синхронной частотой вращения 3000 мин^{-1} , 1500 и 1000 мин^{-1} [8, 9, 36]. На крупных производственных предприятиях для привода стационарного энергонасыщенного оборудования мощность используемых электродвигателей достигает 45 кВт и более.

С развитием науки и техники, совершенствованием технологий, созданием новых электротехнических материалов разрабатывают новые, более совершенные серии электрических машин. В настоящее время промышленность предлагает широкий выбор новой унифицированной серии асинхронных электродвигателей АИ, охватывающей диапазон мощностей от 0,06 до 315 кВт. Имеется 17 типоразмеров двигателей, характеризующихся значениями высоты оси вращения от 50 до 355 мм и частотой вращения 3000 мин^{-1} , 1500, 1000, 750 мин^{-1} . Основные технические характеристики электродвигателей серии АИР мощностью от 0,12 до 112 кВт представлены в приложении А. Электродвигатели, применяемые в с/х оборудовании, насчитывают около 200 типоразмеров, а эксплуатируемое количество свыше 10 млн ед.

Примеры автономного электроснабжения в сельском хозяйстве приведены в работах [1, 4, 13, 16, 18, 19, 21, 22, 24, 33, 40, 68], а в работах [1, 2, 48, 70, 90] даны также примеры автономного электроснабжения технологических процессов.

Таким образом, объектом автономного электроснабжения может быть как сельскохозяйственное предприятие в целом, так и отдельные малые сельскохозяйственные объекты, имеющие оборудование с характерной электродвигательной нагрузкой. Установленная мощность такого оборудования может достигать 45 кВт в зависимости от комплектации и технологических операций.

Энергетические обследования СХП, проведенные Д.А. Филатовым, показали низкую энергоэффективность и электровооруженность предприятий, высокие электрические потери, недоотпуск и плохое качество электроэнергии [92].

В основном сельхозпредприятия имеют один источник питания. Хозяйства, подключенные к системам централизованного электроснабжения, часто испытывают затруднения с электроснабжением, связанных с аварийным состоянием электрических сетей. Низкая пропускная способность сельских электрических сетей а так же их физический износ вызывают аварийные отключения и срыв технологических процессов, что приводит к экономическому

ущербу предприятий. Все эти проблемы решаются частично, от перехода на автономное электроснабжение до государственной поддержки производства электрической энергии на основе возобновляемых источников [78, 84, 91].

1.2 Характеристики ЭГУ с поршневыми ДВС

Широкое применение в сельском хозяйстве нашли ЭГУ на дизельном топливе. Дизельные ЭГУ традиционно использовали в качестве резервных и аварийных, так как для аварийных источников требования к качеству генерируемого напряжения, экономичности, надежности, ресурсу значительно ниже требований ГОСТа [38, 39].

Согласно анализу рынка ЭГУ с двигателями внутреннего сгорания, компании, занимающиеся продажей и техническим обслуживанием ЭГУ, отмечают значительное оживление именно в сегменте отечественной техники рынка электрогенераторных установок. Оживление произошло на предприятиях агропромышленного комплекса и жители сельских районов. По расчетам DISCOVERY Research Group, объем рынка ЭГУ в 2016 г. составил 73 683,4 тыс. долл., в натуральном выражении – 407 186 ед.

В настоящее время отечественные производители дизельных электростанций предлагают потребителю широкий мощностной ряд современных надежных агрегатов с разным уровнем автоматизации.

Зарубежные производители большое внимание уделяют таким потребительским свойствам в соответствии с требованиями ISO 9001, экологическая безопасность, удобство в эксплуатации, контроль.

Из данных по прогнозированию балансов в энергетике, на сектор малой электроэнергетики в России приходится свыше 50 тыс. дизельных и газовых ЭГУ, общая мощность которых около 17 ГВт (8 % всей установленной

мощности страны). Их общая годовая выработка электроэнергии составляет 5 % от общей выработки в стране [50, 66].

По оценкам «Инфолайн», около 10 млн чел. в России постоянно или частично получают электроэнергию от электростанций с ДВС, которых в России насчитывается около 500 тыс. ед., а их суммарная мощность – около 17 ГВт.

На территории нашей страны есть районы, куда подводить сети единой энергетической системы экономически нецелесообразно. Там сооружают сельские дизельные электростанции укрупненной мощности (более 1000 кВт) с полной автоматизацией [6].

В сельских условиях передвижные электростанции применяют для резервного снабжения при ремонте основных питающих линий, для работы перерабатывающих объектов сельскохозяйственного назначения, для электроснабжения отдаленных летних откормочных ферм и т. д.

Современная промышленность предлагает большое количество топливных электростанций различной мощности, комплектации (стационарные, блок-контейнерные) и с различными системами автоматизации, которые можно классифицировать по разным признакам (рисунок 1.5) [45].

Технико-экономические характеристики поршневых электростанций, широко представленных на рынке, приведены в таблице 2.1 приложения Б.

Мощности дизельных ЭГУ варьируются от 2–3 кВт до 5 МВт и более. На выработку 1 кВт·ч современные ДГУ расходуют 180–220 г дизтоплива в зависимости от режима работы [65, 67, 89].

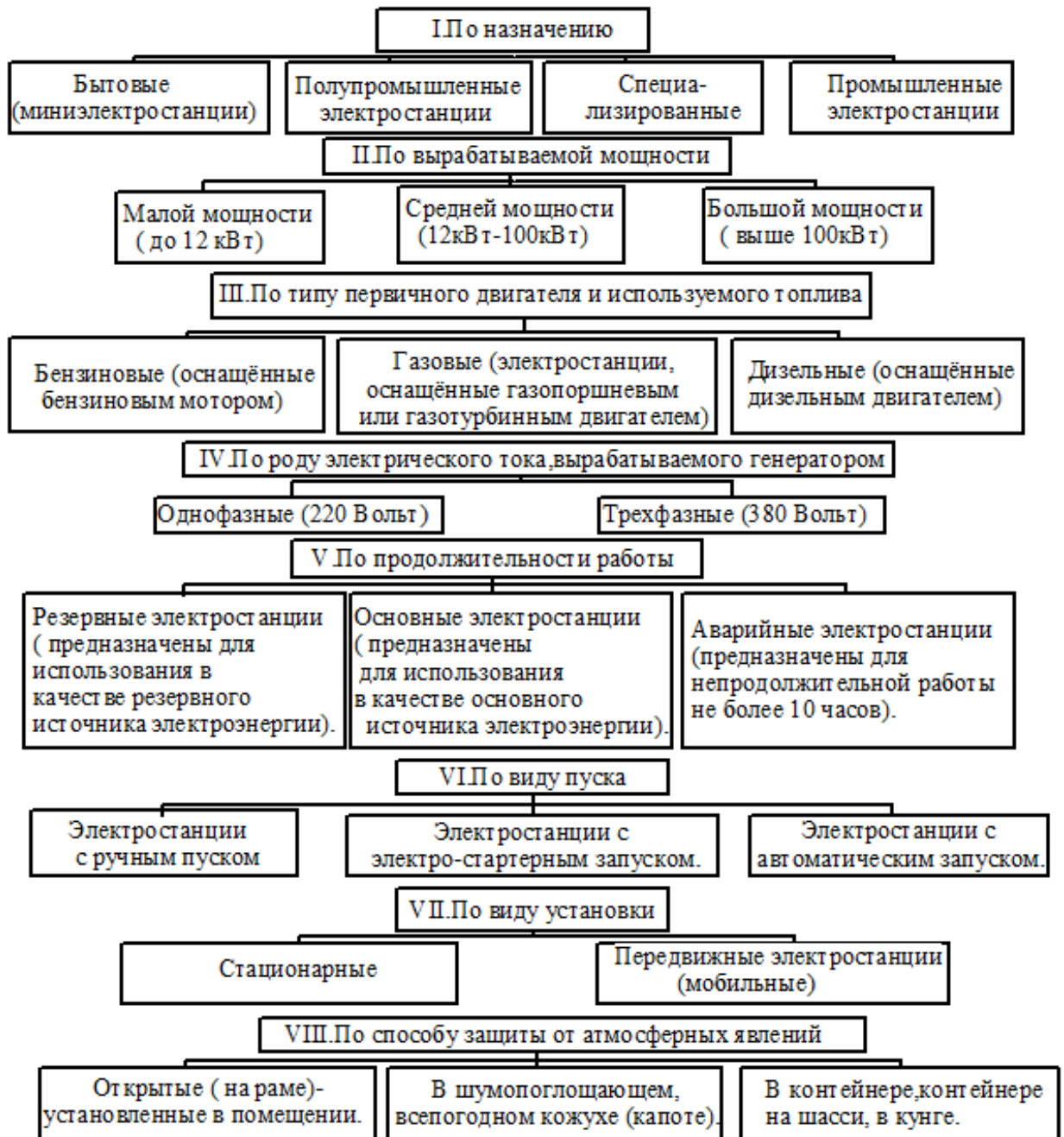


Рисунок 1.5 – Классификация ЭГУ с ДВС

Преимущества ЭГУ с ДВС:

- высокий диапазон мощностей (до 2,5 МВт);
- достаточно большой моторесурс (в среднем до 20000 мото-часов);
- качественная электроэнергия (перепады напряжения менее 1 %, частоты тока – 3 %);
- высокая надежность [40];

- дизельное топливо не взрывоопасно и в обычных условиях почти не горюче;
- отсутствие системы зажигания (перепады температуры и влажности не влияют на вероятность успешного пуска);
- достаточно высокий КПД – 39–47 %.

Недостатки:

- высокий уровень шума;
- загрязнение окружающей среды (высокий уровень выхлопных газов).

В основном ЭГУ с ДВС закрепляют на раму, которую неподвижно крепят на фундамент. Закрытие ЭГУ металлическим корпусом, придает эстетичность и удобство в эксплуатации. Для подачи топлива электростанция имеет расходный бак, вместимость которого может быть различной (определяется необходимым временем работы без дозаправки). Если время работы без заправки составляет более 12 ч, возникает необходимость создания места хранения топлива [40].

Контейнерное исполнение (рисунок 1.6, *а*) дизельных электрогенераторов допускает размещение станции на открытом воздухе.



а



б

Рисунок 1.6 – Дизельных ЭГУ: *а* – контейнерное исполнение ЭГУ;
б – передвижная дизельная ЭГУ на шасси

Производят также передвижные (мобильные) электростанции. Они производятся меньшей мощностью, но их возможность к транспортировке позволяет использовать такие ЭГУ в качестве дополнительных источников и аварийных [74, 75]. Передвижные дизельные генераторы мощностью от 8 до 50 кВт включительно устанавливаются на одноосные шасси (рисунок 1.6, б).

Использование мобильных дизельных электростанций по сравнению со стационарными имеет ряд преимуществ [32]:

- мобильность, удобство транспортирования;
- не требуются мероприятия по инсталляции электростанции (поиск площадки для установки, подготовка фундамента и т. д.);
- полная готовность к эксплуатации.

Существующие дизельные ЭГУ комплектуют, как правило, генераторами переменного тока. Для преобразования механической энергии в электрическую в них применяют синхронный генератор (СГ). В основном ЭГУ рассчитаны на работу с постоянной частотой вращения вала отбора мощности. Частота f генерируемого напряжения связана с частотой вращения приводного вала n формулой:

$$f = \frac{np}{60}, \quad (1.1)$$

где p – число пар полюсов электрической машины.

С помощью системы управления подачей топлива, поддерживается скорость вращения вала n . За счет этого поддерживается стабильность частоты f .

Типовые ЭГУ характеризуются существенной зависимостью удельного расхода топлива от мощности нагрузки. Производители ЭГУ зачастую указывают расход при 75%-й нагрузке на агрегат, не отражающий реальную картину при работе в других режимах. Однако при разной нагрузке на ЭГУ изменяется и расход топлива. В качестве примера на рисунке 1.7 показан график такой зависимости для дизельной электрогенераторной установки Вепрь PS 40.

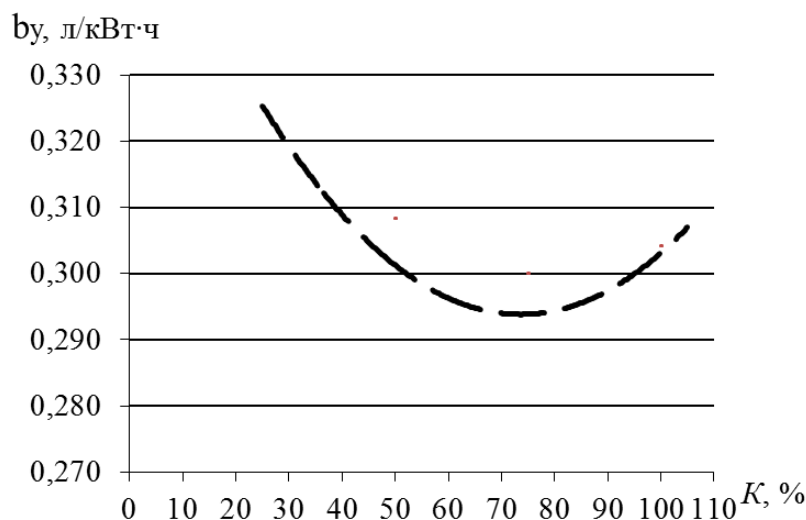


Рисунок 1.7 – Зависимость удельного расхода топлива от загрузки для ЭГУ Вепрь PS 40

Важнейшей характеристикой ЭГУ является удельный расход топлива, который имеет тенденцию изменяться в зависимости от загрузки. Вследствие этого эффективность работы ЭГУ можно оценивать в зависимости от загрузки, так как этот показатель будет влиять на фактический расход топлива, который может оказаться в 1,5–2,0 раза больше заявленного в технических характеристиках [38].

Так как в основном эксплуатационные характеристики ЭГУ во многом определяются приводным ДВС [38, 47], то для одного узла с электродвигательной нагрузкой при решении задачи экономии расхода топлива представляется наиболее рациональным подход, заключающийся в возможном обеспечении загрузки ЭГУ от 70 до 90 %, когда достигается минимальное значение удельного расхода топлива.

1.3 Выбор мощности ЭГУ для питания электродвигательной нагрузки

Одним из основных вопросов при выборе мощности ЭГУ является достаточно точное определение вероятной электрической нагрузки для узла нагрузки и отдельных электроремников (ЭП).

Приемник электрической энергии (электроприемник) – это аппарат, агрегат, механизм, предназначенные для преобразования электрической энергии в другой вид энергии [42].

Значения расчетных нагрузок – это величина, соответствующая такой токовой нагрузке, которая соответствует фактической изменяющейся во времени нагрузке по наибольшему тепловому воздействию на элемент системы электроснабжения, не превышая при этом допустимых значений [59, 73].

Исследования по выбору мощности автономных электростанций постоянного действия отражены в работах И.А. Будзко, Т.Б. Лещинской и др. [1, 4, 6, 25, 26, 33, 38, 70, 81, 83, 95, 98,]. В основном для определения электропотребления и максимальной нагрузки используют типовые суточные графики. Основное условие такое, что номинальная мощность генераторов $P_{г.ном}$ должна быть больше максимальной нагрузки генератора или равняться ей:

$$P_{г.ном} \geq P_{max}. \quad (1.2)$$

Автономные электростанции применяют не только как резервный источник для электроснабжения потребителей I категории, так и в качестве дополнительного источника в часы максимального энергопотребления. Передвижные ЭГУ небольшой мощности часто применяют для электропитания средств механизации строительства и других технологических процессов. Методика выбора мощности резервной электростанции сельскохозяйственных предприятий приведена в работах [26, 44].

Для определения мощности источника питания в системе электроснабжения условие, описанное выражением (1.17), справедливо, когда мощность источника питания значительно превышает единичную мощность электроприемников всей системы.

Для электропитания децентрализованных потребителей широкое применение получили хорошо зарекомендовавшие себя ЭГУ с ДВС. Основным условием при определении мощности ЭГУ считается суммарная мощность

одновременно работающих электроприемников, которая определяется за почасовой максимум в интервале времени с наибольшей нагрузкой с учетом их среднего коэффициента мощности [12, 63, 64, 71].

При создании технологического графика на первом этапе рассматривают процессы, которые необходимо обеспечить в полном объеме, затем те, которые можно снабжать в ограниченном диапазоне мощности. Необходимо также стремиться снизить расчетную нагрузку, уменьшая потребляемую мощность по некоторым процессам, при возможности переносить на другое время суток отдельные процессы и т. д. [70, 79, 81].

М.В. Шелубаев [95] для согласования потребления и выработки энергии автономным источником рассматривал типовые графики электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей, приведенные в [6].

И.В. Закиров [40] рассматривал «Методику определения потребности в средствах электроснабжения для социального развития села», утвержденную Министерством сельского хозяйства Российской Федерации 27 декабря 2001 г. Данная методика предназначена для определения потребности в электроэнергии и средствах электроснабжения как для действующих, так и для вновь создаваемых сельских энергопотребителей [62]. Этот документ содержит модели электрических нагрузок сельских бытовых потребителей и фермерских хозяйств.

В работах С.М. Воронина [21–24] для определения графика нагрузок сельскохозяйственных объектов была использована методика основанная на результатах измерений при малом количестве опытов. Сначала определяются значения мощности j -х нагрузок за i -й интервал времени суток и строится усредненный график нагрузки. Затем рассчитываются параметры распределения электрической нагрузки (определяется среднее значение и среднее стандартное отклонение потребляемой мощности). Опытные параметры сравнивают с параметрами генеральной совокупности [82]. Нагрузка за i -й интервал изменяется по принципу приведения одной случайной величины к другой. Строят графики нагрузки, приведенной к генеральной совокупности [40].

С помощью представленной методики можно построить графики нагрузки для любых сельскохозяйственных автономных объектов без проведения длительных измерений потребления электроэнергии этими объектами. Однако для получения графиков нагрузки сельских автономных потребителей электроэнергии необходимо проводить натурное обследование объекта, что не всегда представляется возможным или требует определенных затрат.

Анализ представленных работ показал, что при выборе мощности источника питания применяют типовые суточные графики нагрузки [30], что целесообразно при неограниченном количестве потребителей.

При расчете нагрузки на ЭГУ и выборе мощности необходимо обратить внимание на загрузку ЭГУ, так как в недогруженном режиме работы (менее 30 % от номинала ЭГУ) снижается срок службы установки [29, 41, 81].

При выборе мощности ЭГУ необходимо знать полную потребляемую мощность, которую можно представить как функцию двух случайных аргументов:

$$S = f(U; I); \quad (1.3)$$

$$S = f(P; Q). \quad (1.4)$$

где U, I – значения величин тока (А) и напряжения (В); P, Q – активная (кВт) и реактивная (кВар) мощности.

При расчете электрических нагрузок, питаемых от централизованной энергосистемы, кратковременные всплески нагрузки не учитываются, так как полную мощность определяют для установившегося режима работы. Учет кратковременного увеличения тока осуществляют при выборе пускозащитной аппаратуры, который производят с учетом время-токовых характеристик и тока мгновенного расцепления (минимальное значение тока, вызывающее автоматическое срабатывание выключателя без преднамеренной выдержки времени).

Мощность выбираемой ЭГУ должна покрывать суммарную электрическую нагрузку потребителя, исключая работу генератора с неполной загрузкой [57, 70, 81].

При выборе параметров системы автономного электроснабжения необходимо знать параметры нагрузки потребителей малой мощности, потребление электроэнергии и типы потребителей. Автономная система электроснабжения значительно отличается от централизованной энергетической системы. Основное отличие заключается в том, что число электроприёмников мало, а единичная мощность электроприёмника может быть соизмерима с мощностью генерирующей установки автономного источника [46, 81, 104, 105, 106].

При выборе ЭГУ в качестве автономного (основного или резервного) источника электроэнергии необходимо учитывать, чтобы ЭГУ обеспечивала пиковую нагрузку, т. е. должно выполняться условие:

$$P_{\text{пик.нагр}} \leq P_{\text{пер.ЭГУ}}, \quad (1.5)$$

где $P_{\text{пик.нагр}}$ – пиковая мощность нагрузки; $P_{\text{пер.ЭГУ}}$ – перегрузочная способность ЭГУ.

Зачастую в каталогах производителей информация о перегрузочной способности ЭГУ не раскрывается полностью, указывается возможность перегрузки ЭГУ только на 10 % в течение часа. При превышении этого значения срабатывает автоматическая защита генератора.

В ГОСТ Р 53987–10 [29] описаны виды мощностей, выдаваемые электрогенераторными установками, из которых выделяют в основном два типа мощности:

- резервную (LTP — Limited Time running Power);
- постоянную (COP — Continuous Operating Power).

Если от ЭГУ необходимо запустить асинхронный двигатель сопоставимой номинальной мощности, то соотношение его пускового коэффициента

к коэффициенту перегрузки ЭГУ должно быть 2,2–2,8. При этом загрузка ЭГУ при запуске двигателя составит менее 50 %.

Производители электрогенераторных установок рекомендуют загрузку не менее 25–40 %. Во время работы ЭГУ на малых нагрузках не полностью сгорает смазочное масло, попадающее в камеру сгорания и частично выносимое в коллектор и выхлопной трубопровод, а оседает на их стенках, где в итоге коксуется. При длительной работе дизеля в таком режиме коксование может привести к уменьшению сечения соплового аппарата и, как следствие, к нарушению нормальной работы дизеля. Так же, при последующих пусках и попадании топлива в выхлопную систему это может привести к взрыву («хлопку»), который часто сопровождается повреждением двигателя. Как правило, для обеспечения работоспособности автономной системы мощность ЭГУ выбирают с 2-, а то и 2,5-кратным завышением, т. е. должно выполняться условие:

$$P_{г.ном.} \geq 2,0 \dots 2,5 P_{ном.нагр.} \quad (1.6)$$

Таким образом, задачи эффективного использования ЭГУ в условиях автономного электроснабжения электродвигательной сосредоточенной нагрузки остаются актуальными.

Как известно, по разным причинам непрерывно изменяются во времени активные и реактивные мощности, потребляемые электродвигателями. В зависимости от особенностей конкретного технологического процесса могут меняться механические нагрузки на валу электродвигателей. Вследствие различных факторов значение напряжения на выводах приемников не постоянно. Многократно доказано, что электрические нагрузки можно рассматривать как случайную величину, подчиняющуюся нормальному закону распределения вероятности [35, 82].

Согласно нормальному закону распределения, расчетная электрическая нагрузка S_p [82,96, 98]:

$$S_p = \bar{S} + \beta\sigma(S), \quad (1.7)$$

где β – коэффициент надежности расчета, определяющий вероятность того, что случайные значения нагрузки останутся меньше принятого расчетного значения; при определении расчетных нагрузок принимают $\beta = 2 \dots 3$.

Для получения расчетной электрической нагрузки определяют математическое ожидание нагрузки \bar{S} и среднеквадратичное отклонение σ :

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n S_i / n; \quad (1.8)$$

$$\sigma(S) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 / (n-1)}. \quad (1.9)$$

В методических указаниях РД [79] приведены основные вероятностные характеристики электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей, а также даны расчетные значения активных и реактивных нагрузок, найденные по аналогии с выражением (1.12).

В работе [35] приведено сравнение результатов расчета при детерминированном и вероятностном подходах определения расчетных нагрузок. Расчеты электрических нагрузок сетей по вероятностным характеристикам нагрузок потребителей выполняют по типовым суточным графикам активной и реактивной мощностей. Типовые графики целесообразно использовать для расчетов в эксплуатируемых электрических сетях.

Таким образом, в зависимости от места и необходимой точности определения расчетных нагрузок выбирают метод расчета. Данные методики целесообразно применять для расчета электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей с большим числом электроприемников, подключенных к централизованной энергетической системе.

При выборе мощности ЭГУ для электропитания средств малой механизации с сосредоточенным многодвигательным электроприводом, опираясь только на данные условия, требуемая мощность ЭГУ будет завышенной бо-

лее чем в два раза, что в процессе работы ЭГУ скажется на ее недогруженности и, как следствие, вызовет повышенный расход топлива и снижение срока службы.

Полную мощность, потребляемую электродвигателем в установившемся режиме работы, можно определить по формуле на основании его технических характеристик:

$$S_p = \frac{P_{д.ном} K_{зд}}{\eta_d \cos \varphi_{д.ном}}, \quad (1.10)$$

где $P_{д.ном}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт; $K_{зд}$ – коэффициент загрузки электродвигателя; η_d – КПД электродвигателя; $\cos \varphi_{д.ном}$ – номинальное значение коэффициента мощности электродвигателя.

В момент пуска асинхронного электродвигателя существенно увеличивается реактивная составляющая мощности, обусловленная многократным превышением пускового тока над номинальным значением тока (рисунок 1.9).

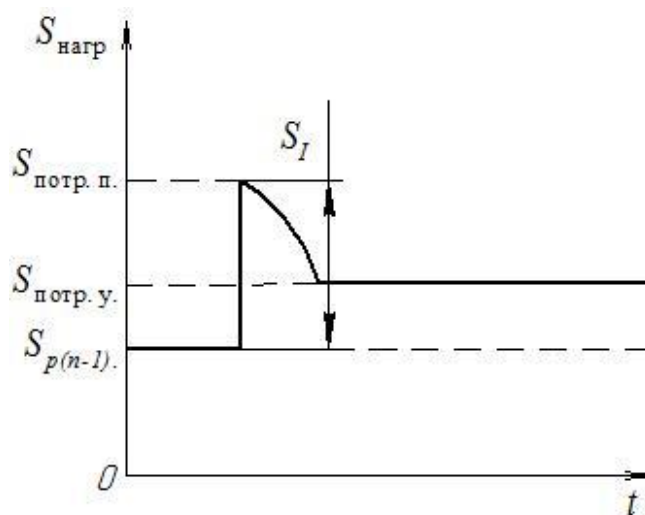


Рисунок 1.9 – Изменение потребляемой мощности узлом двигательной нагрузки

Полную мощность для пускового режима электродвигателя определяют с учетом пусковых токов по формуле:

$$S_I = \frac{P_{\text{д.ном}} k_I}{\eta_{\text{д}} \cos \varphi_{\text{д.ном}}}, \quad (1.11)$$

где k_I – кратность пускового тока электродвигателя.

Таким образом, потребляемую мощность узла двигательной нагрузки в пусковом $S_{\text{потр.п}}$ и установившемся $S_{\text{потр.у}}$ режимах работы электродвигателей можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} S_{\text{потр.п}} = \sum_{i=1}^n S_{p(n-1)} + S_I + S_{\text{пр}}; \\ S_{\text{потр.у}} = \sum_{i=1}^n S_p + S_{\text{пр}}, \end{cases} \quad (1.12)$$

где $S_{p(n-1)}$ – суммарная мощность электродвигателей, работающих в момент пуска в установившемся режиме; S_I – пусковая мощность запускаемого электродвигателя; $S_{\text{пр}}$ – мощность прочей нагрузки; S_p – полная мощность работающего электродвигателя.

При определении нагрузки локальной группы потребителей необходимо рассматривать потребляемую мощность электродвигателя в пусковом и установившемся режимах работы.

1.4 Определение устойчивости системы ЭГУ с электродвигательной нагрузкой

Если электрогенераторная установка должна обеспечить покрытие нагрузки, в основном состоящей из асинхронных короткозамкнутых электродвигателей с характерной для них активно-индуктивной нагрузкой и пусковыми токами, то определение мощности такой нагрузки следует выполнять с учетом кратности пусковых токов.

Считается, что прямой способ запуска асинхронного электродвигателя является жестким, однако в практически всех с/х технологических установках он является основным. Необходимо учитывать кратность пускового тока для того, чтобы обеспечить запуск самого мощного электродвигателя от ЭГУ, без провала напряжения и, как следствие, возможной остановки двигателя внутреннего сгорания ЭГУ. Влияние этого случая возможно в технологической схеме производства, где оборудование приводится мощным асинхронным электродвигателем, сопоставимым по мощности с ЭГУ. В связи с этим при выборе мощности ЭГУ одной из основных задач является определение влияния величины и характера электрической нагрузки на устойчивость работы автономной системы электроснабжения.

Если провести параллель с централизованной системой, в которой вероятность нарушения устойчивости только в аварийных или послеаварийных режимах, то в автономных системах нарушение устойчивости может произойти и при нормальных режимах эксплуатации. Например, если мощность нагрузок соизмерима с мощностью автономного источника. В такой системе опасным является прямой запуск асинхронных короткозамкнутых электродвигателей. В результате резкое снижение напряжения в системе может привести к остановке работающих двигателей и возникновению лавины напряжения.

Методики проверки системы на устойчивость приведены в работах [11, 61, 87, 93]. В основе данных методик лежит расчет допустимого отклонения напряжения.

Согласно [93], пуск электродвигателя от генератора возможен при условии, что отклонение напряжения на зажимах электродвигателя не более 30 %. В рабочем режиме отклонение напряжения составляет 7,5 % и +10 % от номинального [87].

Отклонение напряжения на зажимах электродвигателя при пуске:

$$\Delta U_{\phi} = \frac{z_{\Gamma} + z_{\text{л}}}{z_{\Gamma} + z_{\text{л}} + z_{\text{д}}}, \quad (1.13)$$

где z_{Γ} – сопротивление генератора, Ом, $z_{\Gamma} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном.Г.}} \text{ОКЗ}}$; $z_{\text{л}}$ – полное сопротивление линии, Ом, $z_{\text{л}} = z_0 l$; $z_{\text{д}}$ – полное сопротивление короткого замыкания асинхронного двигателя, Ом, $z_{\text{д}} = \frac{U_{\text{ном}}}{k_i I_{\text{н.д}}}$; ОКЗ – отношение короткого замыкания генератора (кратность при возбуждении холостого хода, которое при номинальной частоте вращения машины и при разомкнутой обмотке якоря дает на выводах генератора номинальное напряжение); $I_{\text{ном.Г.}}$, $I_{\text{н.д}}$ – номинальные токи генератора и двигателя соответственно.

Зная значения кратности пускового момента $\mu_{\text{п}}$ электродвигателя по механической характеристике машины и кратности момента ее трогания $\mu_{\text{тр}}$, определяют допустимое отклонение напряжения на двигателе:

$$\Delta U_{\text{д.доп}} = 1 - \sqrt{\frac{\mu_{\text{тр}} + 0,25}{\mu_{\text{п}}}}. \quad (1.14)$$

Если

$$\Delta U_{\phi} < \Delta U_{\text{д.доп}} \leq 0,3, \quad (1.15)$$

то пуск двигателя обеспечен.

Питание от генератора соизмеримой мощности изучено И.А. Сыромятниковым [87]. В работе проведен анализ процесса изменения напряжения на зажимах генератора во время пуска электродвигателя. Описан процесс запуска электродвигателя от генератора соизмеримой мощности и дана формула для определения начального значения напряжения на зажимах генератора по переходной ЭДС в момент включения электродвигателя. Установившееся значение напряжения определяют по зависимостям [87] напряжения генератора $U_{\Gamma}/U_{\Gamma.\text{ном}}$ от условной пусковой мощности генератора $S_{\text{п}}/S_{\Gamma.\text{ном}}$. Мощность

генератора выбирают из условия возможности пуска двигателя при допустимом нагреве его обмоток пусковыми токами.

В теории принимают, что начальная переходная ЭДС генератора равна номинальному напряжению, превышающему на 5 % номинальное напряжение двигателей. В отличие от работы А.П. Фоменкова [93], в данной методике отклонение напряжения, необходимое для пуска двигателя, выражается в относительных единицах, которые составляют 0,7 номинального напряжения генератора [87].

При имеющихся данных продольного переходного сопротивления генератора x'_d , $k_{и.нач}$ и параметрах двигателя определяют мощность двигателя, который может запустить генератор:

$$P_{д.ном} = \frac{S_{г.ном} \eta_{д.ном} \cos \varphi_{д.ном}}{\chi_{п} \cdot 1,05 k_I}, \quad (1.16)$$

где

$$\chi_{п} = \frac{k_{и.нач} x'_d}{1,05 - k_{и.нач}} \quad (1.17)$$

при

$$k_{и.нач} = \frac{U_{нач}}{U_{д.ном}}, \quad (1.18)$$

где $S_{г.ном}$, $\eta_{д.ном}$, $\cos \varphi_{д.ном}$ – соответственно номинальная полная мощность генератора, КПД двигателя, коэффициент мощности двигателя; $\chi_{п}$ – индуктивное переходное сопротивление генератора; k_I – кратность пускового тока двигателя; x'_d – продольное переходное сопротивление генератора; $U_{нач}$ – начальное напряжение, В; $U_{д.ном}$ – номинальное напряжение, В.

Анализ, проведенный в работе [88], показал, что влияние коэффициента мощности на значение напряжения при разных значениях пусковой мощности оказывает влияние исключительно при небольших нагрузках, а влияние ОКЗ относительно мало. Поэтому с достаточной степенью точности

можно пользоваться зависимостями напряжения на генераторе от условной пусковой мощности в установившемся режиме.

Если генератор работает с нагрузкой, то к условиям пуска двигателя добавляется условие допустимого снижения напряжения при пуске на других электроприемниках. Принимается, что относительное напряжение на общих шинах при пуске двигателя должно быть не меньше 0,85.

Изменение напряжения на генераторе от начального значения до установившегося напряжения будет происходить по экспоненциальному закону:

$$U = U_{уст} - (U_{уст} - U_{нач}) e^{-t/\tau_d}. \quad (1.19)$$

В работе [43] представлен анализ режимов запуска мощного асинхронного электродвигателя от генератора соизмеримой мощности, приведено моделирование пуска двигателя. В общем случае при выборе ЭГУ следует руководствоваться правилом: мощность ЭГУ должна быть в 2,0–2,5 раза больше мощности самого крупного электродвигателя.

Одним из способов повышения энергоэффективности и минимизации энергозатрат в технологических процессах АПК является реализация энергоэффективных режимов работы асинхронных электродвигателей. Для достижения поставленной цели необходимо выявить способ управления асинхронным двигателем, применение которого позволит оптимизировать режим работы двигателя [9].

Анализ работ показал, что исследования проверки возможности запуска электродвигателя от ЭГУ соизмеримой мощности основаны на определении и проверки отклонения напряжения на зажимах электродвигателей и ЭГУ от допустимого, а также изменения напряжения на ЭГУ от начального значения до установившегося значения напряжения, подчиняющегося экспоненциальному закону.

Исследования процессов пуска двигателей и устойчивости узлов нагрузки, питаемых от ЭГУ соизмеримой мощности, могут быть взяты за основу для разработки порядка определения и выбора мощности автономного

источника питания – ЭГУ для электроснабжения сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой.

Выводы и постановка цели и задач исследования

Анализ научных источников, нормативных документов и справочников, информации заводов-изготовителей современного сельскохозяйственного зерноочистительного оборудования с многодвигательным электроприводом показал, что в большинстве машин для первичной обработки зерна с многодвигательным электроприводом устанавливают от 1 до 5 электродвигателей мощностью от 0,37 до 15 кВт. Установленная мощность машины может состоять из мощности одного электропривода, а также может включать в себя несколько электроприводов. Использование такого рода оборудования носит сезонный характер, во много не требующий круглогодичной потребности в электроэнергии.

В настоящее время вырос спрос на дождевальные машины, лидирующие позиции которых занимают машины кругового действия. Как показывают данные исследований, около 52 % дождевальных машин используют с электрическим приводом. Источниками для электроснабжения дождевальных машин могут быть как кабельная линия, так и ЭГУ. Также можно выделить еще десятки способов энергоснабжения ДМ. Однако по ряду причин для обеспечения электроэнергией электрифицированных дождевальных машин в 50 % случаях используют ЭГУ.

Выбор мощности ЭГУ, основанный на типовых суточных графиках нагрузок электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, не дает удовлетворительных результатов. Данные методики широко применяют при проектировании централизованной сети при большом числе потребителей, однако для технологических процессов и средств малой механизации преимущественно с ограниченным числом электроприемников они не пригодны,

поскольку учитывают максимальную мгновенную потребляемую мощность одновременно включенных электроприемников. Они также не учитывают влияние самого мощного единичного электроприемника, т. е. наихудший случай для автономной системы.

Принимая во внимание тот факт, что на рынке продают и покупают тысячи электростанций с поршневыми двигателями внутреннего сгорания разной мощности, назначения и исполнения для всех сфер народного хозяйства, в том числе и для сельскохозяйственных нужд, спрос на автономные источники питания с ДВС можно оценить как существенный.

При анализе способов выбора мощности ЭГУ для питания электродвигательной нагрузки определено, что одним из недостатков является отсутствие подхода, учитывающего очередность включения электроприводов и определение загрузки ЭГУ в процессе работы, которое ведет к снижению эффективности использования ЭГУ.

В соответствии с вышеизложенным **целью** диссертационной работы является повышение энергетической эффективности электрогенераторной установки при питании многодвигательных электроприводов обоснованием соотношения запаса мощности ЭГУ с очередностью запуска электродвигателей.

Для достижения поставленной цели в работе предусмотрено решение следующих **задач**:

- выполнить анализ использования ЭГУ для автономного питания технологических процессов и состава сосредоточенной электродвигательной нагрузки различного сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве);
- теоретически определить влияние последовательности запуска асинхронных электродвигателей в технологическом процессе передвижной установки на допустимое соотношение мощностей в системе «ЭГУ – многодвигательный электропривод»;

- разработать порядок определения и выбора мощности автономного источника питания – ЭГУ для электроснабжения сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой;
- экспериментально подтвердить влияние обоснованного порядка запуска асинхронных электродвигателей в технологическом процессе на устойчивость электрического режима и улучшение показателей энергоэффективности ЭГУ;
- определить экономическую эффективность применения автономного источника питания – ЭГУ, выбранного на основании предложенного расчета.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ МОЩНОСТИ ЭГУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ

2.1 Условия выбора мощности генератора с приводом от двигателя внутреннего сгорания

Эффективность работы автономного источника электропитания с приводом от двигателя внутреннего сгорания характеризуется такими показателями, как загрузка ЭГУ в длительном режиме работы, способность генератора выдерживать кратковременные перегрузки и удельный расход топлива.

Показатели эффективности взаимосвязаны, повышение эффективности с улучшением всех показателей не всегда возможно, поэтому для получения эффекта предлагается найти такое рациональное значение требуемой мощности посредством учета факторов, влияющих на показатели работы электрогенераторной установки.

Определяя требуемую мощность ЭГУ, необходимо обратить внимание на условие, обусловленное перегрузочной способностью генератора и особенность работы двигателей внутреннего сгорания в длительном режиме. В расчет необходимо ввести учёт увеличения потребляемой мощности запускаемого электродвигателя и возможность генератора обеспечивать выдержку кратковременной перегрузки. Возможность перегрузки ограничивается величиной тока короткого замыкания и для генераторов с АРВ составляют 300 % в течение 10 с.

Также следует учитывать, что загрузка ЭГУ в длительном режиме работы должна составлять 80 % от номинальной мощности ЭГУ при заложенной заводом-изготовителем дополнительной мощности в 10 % от его номинальной мощности для обеспечения функции регулирования при внезапной (случайной) приложенной нагрузке на ЭГУ.

Учитывая рекомендации по загрузке ЭГУ и порядок запуска электродвигателей в технологическом процессе, можно записать условие для расчета требуемой мощности ЭГУ:

$$\begin{cases} S_{\Gamma(\text{ЛТР})} \geq \sum_{i=1}^{n-1} S_p + S_{\Pi} + S_{\text{пр}}; \\ S_{\Gamma(\text{СОР})} \geq \sum_{i=1}^n S_p + S_{\text{пр}}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $S_{\Gamma(\text{ЛТР})}$ – максимально допустимая мощность ЭГУ при внезапном увеличении нагрузки на ЭГУ, кВ·А; S_p – расчетная полная мощность работающего электродвигателя, кВ·А; S_{Π} – пусковая мощность запускаемого электродвигателя, кВ·А; $S_{\Gamma(\text{СОР})}$ – мощность ЭГУ при работе на установившуюся нагрузку, кВ·А; $S_{\text{пр}}$ – мощность прочей нагрузки, кВ·А.

Подставив выражения (1.10) и (1.11) для расчета полной мощности ЭГУ в неравенство (2.1), получим:

$$\begin{cases} S_{\Gamma(\text{ЛТР})} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_{д.i} K_{з.д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}} + \frac{P_{д.I} k_I}{\eta_{д.I} \cos \varphi_{д.I}}; \\ S_{\Gamma(\text{СОР})} \geq \sum_{i=1}^n \frac{P_{д.i} K_{з.д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}}, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $P_{д.i}$ – мощность работающего электродвигателя, кВт; $K_{з.д.i}$ – коэффициент загрузки i -го работающего электродвигателя; $\eta_{д.i}$ – КПД i -го работающего электродвигателя; $\cos \varphi_{д.i}$ – номинальное значение коэффициента мощности работающего i -го электродвигателя; $P_{д.I}$ – мощность запускаемого электродвигателя, кВт; $\eta_{д.I}$ – КПД запускаемого электродвигателя; $\cos \varphi_{д.I}$ – номинальное значение коэффициента мощности запускаемого электродвигателя; k_I – кратность пускового тока электродвигателя.

При эксплуатации ЭГУ рекомендуемым режимом является работа, при которой средняя допустимая загрузка по мощности [28, 29] в течение 24 ч не превышает 80 % от номинальной мощности ЭГУ. При минимально возможном коэффициенте загрузки электродвигателей, параметр загрузки ЭГУ в длительном режиме работы должен быть больше 0,5 [70, 81].

Таким образом, для условия $S_{Г(сop)}$ в установившемся длительном режиме работы коэффициент загрузки ЭГУ $K_{з.г}$ должен составлять от 0,5 до 0,8.

Так как коэффициент загрузки электродвигателей различен, введем параметр приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки $K_{з.срв}$ для узла электродвигательной нагрузки как величину усредненного коэффициента загрузки группы электродвигателей, отнесенного к коэффициенту загрузки ЭГУ:

$$K_{з.срв} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{з.д.i} P_{д.i}}{K_{з.г} \sum_{i=1}^n P_{д.i}}, \quad (2.3)$$

где $K_{з.д.i}$ – коэффициент загрузки i -го электродвигателя; $P_{д.i}$ – мощность i -го электродвигателя, кВт; $K_{з.г}$ – коэффициент загрузки электрогенерирующей установки.

Таким образом, условие для определения номинальной мощности в длительном режиме работы ЭГУ можно представить следующим образом:

$$S_{г.ном} \geq \sum_{i=1}^n \frac{P_{д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}} K_{з.срв}. \quad (2.4)$$

Решением неравенства (2.4) определяют требуемую мощность ЭГУ для установившегося режима работы узла электродвигательной нагрузки. В этом случае загрузка ЭГУ в длительном режиме работы будет составлять 80 %.

Для определения влияния порядка запуска асинхронных электродвигателей на требуемую мощность ЭГУ необходимо более подробно рассмотреть первое условие системы неравенств (2.2).

2.2 Влияние порядка запуска электродвигателя в технологическом процессе на требуемую мощность источника соизмеримой мощности

Как известно, прямой пуск короткозамкнутых асинхронных электродвигателей сопровождается пусковыми токами, многократно превышающими над номинальными токами, что вызывает резкое снижение напряжения в системе, и приводит к увеличению скольжения остальных уже работающих двигателей. Потребляемая электродвигателями реактивная мощность, возрастает, чем вызывает дальнейшее понижение напряжения и может привести к остановке работающих двигателей с последующим возникновением лавины напряжения. В автономной системе при условии соизмеримости мощности источника питания с мощностью потребителя этому необходимо уделить особое внимание.

Для определения влияния номинальной мощности запускаемого электродвигателя на требуемую мощность ЭГУ рассмотрены два характерных случая, когда самый мощный электродвигатель запускается первым или последним (рисунок 2.1).

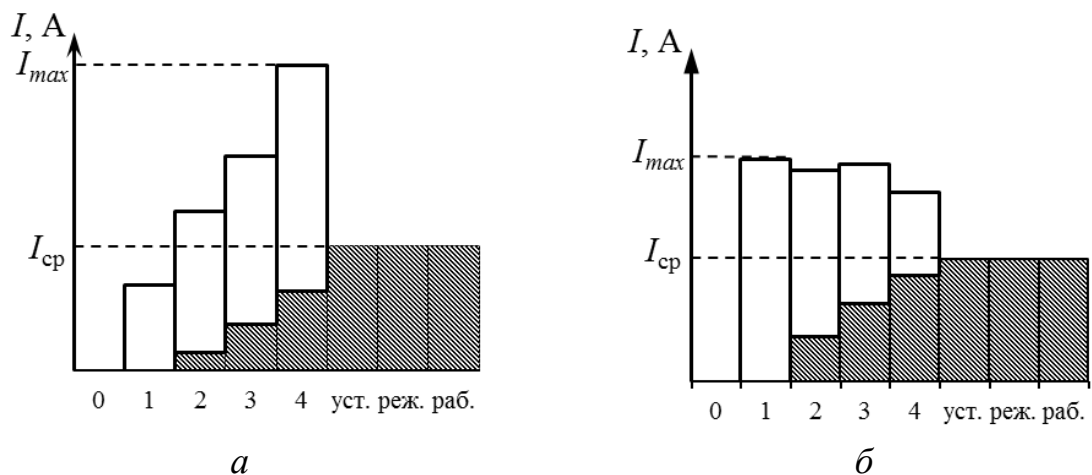


Рисунок 2.1 – Гистограмма пусковых токов:

a – самый мощный электродвигатель запускается последним;

б – самый мощный электродвигатель запускается первым;

I_{max} – максимальная величина тока, А; I_{cp} – среднее значение тока в установившемся режиме работы, А; \square – величина пускового тока;

\blacksquare – средняя величина тока в установившемся режиме

Так, запуск самого мощного электродвигателя первым (рисунок 2.2, б) позволяет снизить максимально возможное значение пиковых пусковых токов, тогда как при запуске его последним (рисунок 2.2, а) величина пускового тока может значительно превосходить значения тока в установившемся режиме работы группы электродвигателей. Восприятие источником пусковых токов электродвигателей должно быть учтено при выборе мощности ЭГУ. Если все электродвигатели одинаковой мощности, то влияние пиковых пусковых токов будет только в момент запуска последнего электродвигателя.

Исходя из вышеизложенного выдвинуто предположение о том, что для заданного узла нагрузки требуемая мощность ЭГУ может быть неоднозначной, т. е. существует зависимость требуемой мощности источника от очередности запуска электродвигателей в технологическом процессе.

Для дальнейших расчетов допускаем, что значение номинального напряжения на генераторе ЭГУ на 5 % превышает значение номинального напряжения запускаемого электродвигателя. Принимая во внимание перегрузочную способность генератора по току k_Q и особенность работы в длительном режиме двигателей внутреннего сгорания K_L , неравенство для $S_{r(LTP)}$ примет вид:

$$S_{r(LTP)} \geq \frac{1,11k_I P_{д.л}}{\eta_{д.л} \cos \varphi_{д.л} K_L k_Q}, \quad (2.5)$$

где k_Q – коэффициент, учитывающий возможность перегрузки генератора по току; K_L – коэффициент, учитывающий перегрузочную способность первичного двигателя в длительном режиме работы.

Подставив технические характеристики электродвигателей серии АИР мощностью от 0,12 до 100 кВт (см. приложение А) в неравенство (2.5), получили зависимость изменения расчетной мощности ЭГУ от мощности запускаемого электродвигателя (рисунок 2.2).

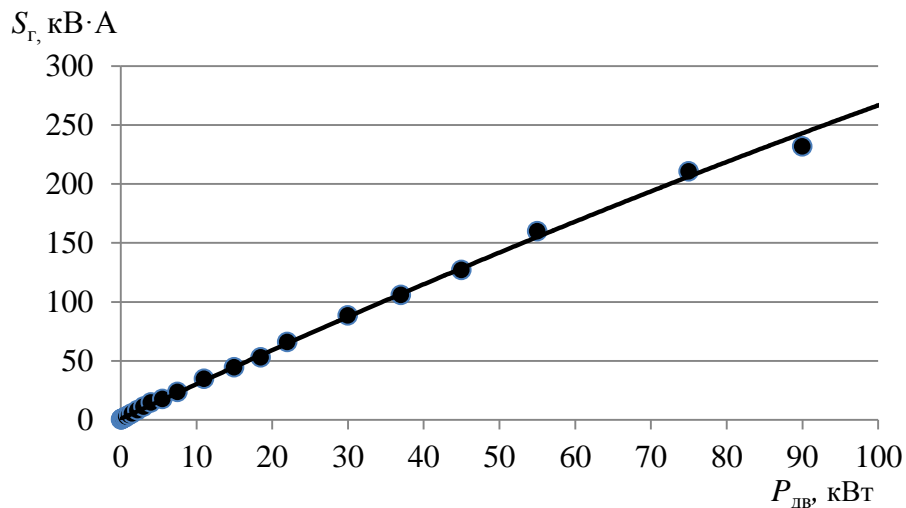


Рисунок 2.2 – Зависимость требуемой мощности ЭГУ $S_{г.ном}$ от мощности запускаемого электродвигателя $P_{д.ном}$

Исследования по определению требуемой мощности ЭГУ при условии запуска соизмеримого по мощности электродвигателя с мощностью ЭГУ позволили установить, что номинальная мощность асинхронного электродвигателя для прямого его запуска от ЭГУ не должна быть более 45 % от номинальной мощности ЭГУ.

Таким образом, зависимость изменения мощности ЭГУ от мощности запускаемого электродвигателя можно представить как прямолинейную.

Если при запуске электродвигателя на зажимах генератора подключена электрическая нагрузка, то неравенство для определения требуемой мощности генератора примет вид:

$$S_{г.ном} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_{д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}} K_{з.срв} + \frac{1,11k_I P_{д.I}}{\eta_{д.I} \cos \varphi_{д.I} K_L k_Q} . \quad (2.6)$$

Для дальнейших расчетов по неравенству (2.6) условимся, что первое слагаемое приведено к эффективному числу электроприемников. Это позволит рассматривать мощность работающих электродвигателей как фиксированную величину нагрузки с шагом, равным мощности эффективного элек-

троприемника, определенного по средним параметрам рассматриваемой группы электродвигателей:

$$N_3 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n-1} P_{д_i} \right]^2}{\sum_{i=1}^{n-1} P_{д_i}^2}. \quad (2.7)$$

По неравенству (2.6) произведен расчет определения требуемой мощности ЭГУ от мощности запускаемого электродвигателя и уже имеющейся нагрузки на ЭГУ. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.1

Таблица 2.1 – Результаты расчета требуемой мощности ЭГУ по выражению (2.6)

$P_{дв.}$ P_i		Мощность запускаемого электродвигателя, кВт								
		0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5
Мощность имеющейся нагрузки на ЭГУ, кВт·А	0,0	1,5	2,1	3,2	4,5	6,7	9,2	12,4	17,1	23,3
	1,2	2,7	3,3	4,4	5,7	7,9	10,4	13,5	18,2	24,4
	2,4	4,0	4,6	5,8	7,0	9,2	11,8	14,9	19,6	25,8
	3,7	5,2	5,8	6,9	8,2	10,4	12,9	16,1	20,8	27,0
	4,9	6,4	7,0	8,1	9,4	11,6	14,1	17,2	21,9	28,1
	6,1	7,5	8,2	9,3	10,5	12,7	15,3	18,4	23,1	29,3
	7,2	8,7	9,3	10,4	11,7	13,9	16,4	19,6	24,3	30,5
	8,4	9,9	10,5	11,6	12,9	15,1	17,6	20,7	25,4	31,7
	9,6	11,0	11,7	12,8	14,0	16,3	18,8	21,9	26,6	32,8
	10,8	12,2	12,8	14,0	15,2	17,4	19,9	23,1	27,8	34,0
	11,9	13,4	14,0	15,1	16,4	18,6	21,1	24,3	29,0	35,2
	13,1	14,6	15,2	16,3	17,6	19,8	22,3	25,4	30,1	36,3
	14,3	15,7	16,4	17,5	18,7	20,9	23,5	26,6	31,3	37,5
	15,4	16,9	17,5	18,6	19,9	22,1	24,6	27,8	32,5	38,7
	16,6	18,1	18,7	19,8	21,1	23,3	25,8	28,9	33,6	39,9
	17,8	19,2	19,9	21,0	22,2	24,5	27,0	30,1	34,8	41,0
18,9	20,4	21,0	22,2	23,3	25,6	28,1	31,3	36,0	42,2	
20,1	21,6	22,2	23,3	24,6	26,8	29,3	32,5	37,2	43,4	

Полученное неравенство (2.6) отражает сложную зависимость влияния установленных параметров электродвигателей и их место в технологической цепочке на требуемую расчетную мощность генератора автономного источника электроснабжения. Первое слагаемое неравенства (2.6) представляет собой P_i – имеющуюся нагрузку на ЭГУ в диапазоне от 0 до 20,1 с шагом 1,2 кВт·А.

Во второе слагаемое неравенства (2.6) подставлены технические характеристики электродвигателей мощностью 0,55 кВт; 0,75; 1,1...7,5 кВт (см. приложение А).

Результаты расчетов неравенства (2.6) с разными переменными позволили определить требуемую мощность ЭГУ с учетом единичной мощности и очередности запуска электродвигателей в технологическом процессе.

По результатам исследований определена граница возможных мощностей очередных запускаемых электродвигателей, пуск которых допустим после ранее запущенных. На рисунке 2.3 представлено допустимое соотношение мощности «ЭГУ – нагрузка» при дискретном нагружении генератора.

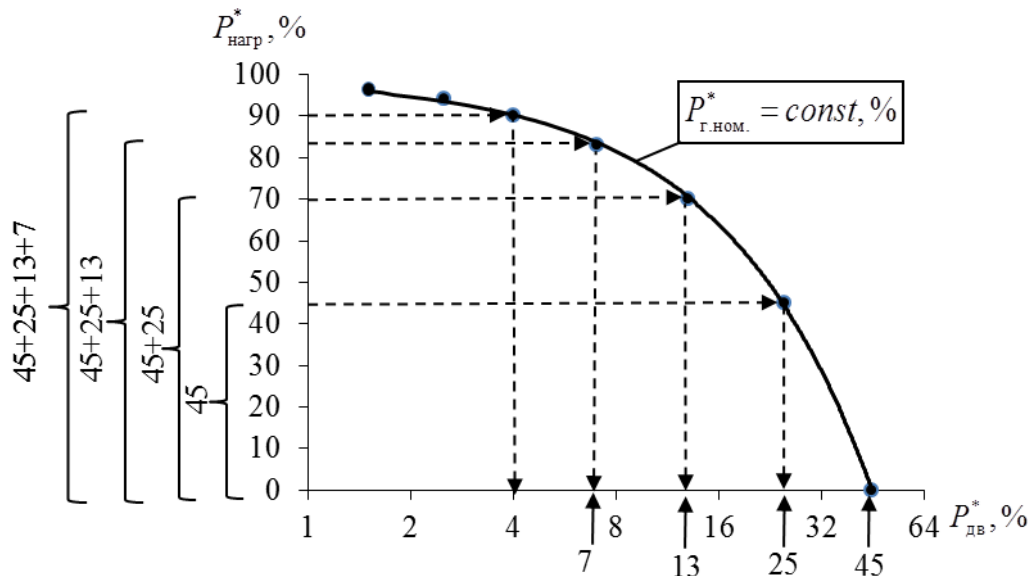


Рисунок 2.3 – Допустимое соотношение мощности «ЭГУ – нагрузка» при дискретном нагружении генератора

Выявлено влияние порядка запуска электродвигателей на расчетную мощность ЭГУ. Для подбора требуемой мощности установки к заданному узлу двигательной нагрузки мощность запускаемых электродвигателей этой группы должна составлять не более 45 % от остаточной мощности нагружаемого генератора – $0,45(P_{г.ном.}^* - P_{нагр.}^*)$. Если номинальная мощность первого электродвигателя составила $0,45P_{г.ном.}^*$, то мощность второго должна быть не

более $0,25P_{Г.НОМ}$, а при имеющейся нагрузке 70 % допустимая мощность запускаемого электродвигателя – не более $0,13P_{Г.НОМ}$, или $0,45 \cdot (100 - 70) \%$. Тогда генератор обеспечит успешный прямой пуск асинхронных электродвигателей в технологической цепочке, при этом исключается необходимость применения других способов ограничения их пусковой мощности.

При изменении порядка запуска в технологической цепочке для заданного узла электродвигательной нагрузки требуемая (необходимая) мощность ЭГУ для успешного пуска электродвигателей изменится в зависимости от выбранной очередности запуска.

На рисунке 2.4 приведена разработанная номограмма определения мощности электростанции для имеющегося мощностного ряда выпускаемых электрогенераторов с приводом от двигателя внутреннего сгорания и асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором [17].

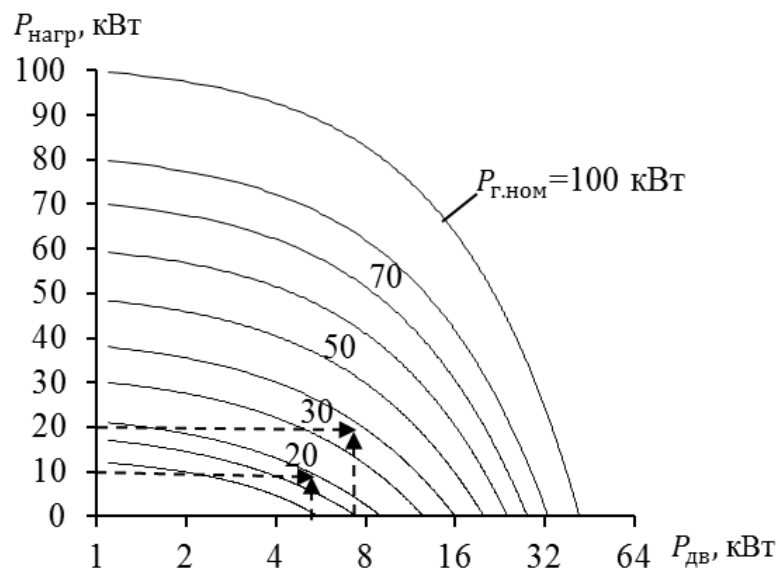


Рисунок 2.4 – Номограмма для определения требуемой мощности ЭГУ

Для выбора мощности ЭГУ, работающей на обеспечение электроэнергией производственных процессов с преобладанием двигательной нагрузки, по номограмме необходимо найти точки расчетной мощности ЭГУ на пересечении значений номинальной мощности каждого запускаемого электро-

двигателя в технологическом порядке их пуска и величины нагрузки на момент пуска. По наибольшему из найденных значений выбрать соответствующую по мощности электрогенераторную установку.

Полученные результаты дали возможность установить влияние порядка запуска электродвигателей на определение требуемой мощности ЭГУ для автономного питания. Проведенные теоретические исследования позволяют рассматривать вопрос выбора мощности ЭГУ с учетом порядка запуска электродвигателей [17].

Выявлено влияние порядка запуска электродвигателей на требуемую мощность в пусковом и установившемся режимах узла двигательной нагрузки. Определена область допустимого процентного соотношения мощностей запускаемых электродвигателей и нагрузки на ЭГУ, при которых ЭГУ обеспечит успешный запуск электродвигателей группы в заданном порядке.

Для оценки взаимосвязи мощности узла электродвигательной нагрузки и выходной длительной мощности ЭГУ необходимо попытаться определить соизмеримость мощности источника и нагрузки. Для этого предлагается ввести так называемый коэффициент соизмеримости.

2.3 Определение соизмеримости мощности ЭГУ с мощностью узла двигательной нагрузки

Для оценки соизмеримости мощности узла нагрузки с мощностью ЭГУ выполнен анализ области решения системы неравенств (2.2), который показал, что ключевым (но не единственным) фактором соизмеримости является единичная мощность электроприёмников узла нагрузки. Так, в случае прямого пуска единственного асинхронного электродвигателя от ЭГУ требуемая мощность ЭГУ должна превышать мощность запускаемого электродвигателя в 2,2–2,6 раза, что следует из первого уравнения системы (2.2). Если узел нагрузки представлен несколькими асинхронными электродвигателями, то

оценку соизмеримости необходимо выполнить исходя из сопоставления величин первого и второго уравнений системы (2.2). Таким образом, при множестве электроприёмников и несущественной разности их мощностей в узле нагрузки не наблюдается соизмеримость мощности отдельных электроприёмников и мощности ЭГУ, что подтвердится преобладанием второго неравенства системы (2.2) над первым.

Исходя из возможных результатов расчета требуемой мощности ЭГУ для узла нагрузки в заданных условиях эксплуатации нами предлагается выполнять оценку подобранной ЭГУ с помощью коэффициента соизмеримости K^* , представленного отношением установленной мощности ЭГУ к мощности узла нагрузки:

$$K^* = \frac{S_{г.ном}}{S_{нагр}} \bar{S}_{г.СОР},$$

(2.8)

где $S_{нагр}$ – полная мощность узла нагрузки, кВ·А; $S_{г.ном}$ – величина номинальной мощности ЭГУ, кВ·А; $\bar{S}_{г.СОР}$ – длительная мощность ЭГУ, отн. ед. ($\bar{S}_{г.СОР} = 0,8$, что соответствует загрузке ЭГУ на 80 %).

По полученным расчетным данным требуемой мощности ЭГУ из системы неравенств (2.5) выбирают ЭГУ по ближайшей большей мощности из предлагаемых производителями. Затем выполняют оценку соизмеримости ее мощности с мощностью узла нагрузки.

Коэффициент соизмеримости отражает влияние мощности узла нагрузки на величину требуемой мощности ЭГУ. С его помощью можно установить, какова будет величина загрузки выбранной ЭГУ при ее работе на заданный узел нагрузки.

Показатель загрузки ЭГУ ($K_{з.г.}$, %) с учетом $\bar{S}_{г.СОР} = 0,8$ можно записать следующим образом:

$$K_{з.г.} = K^{*-1} \bar{S}_{г.СОР} \cdot 100 \%. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) является функцией связи зависимости загрузки ЭГУ в установившемся режиме работы от коэффициента соизмеримости (рисунок 2.5).

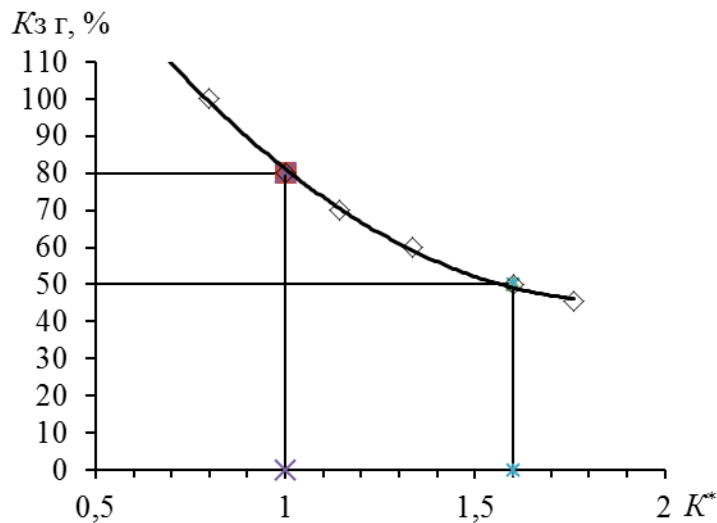


Рисунок 2.5 – Графическое представление коэффициента соизмеримости и загрузки ЭГУ

На графике выделена область допустимых значений коэффициента соизмеримости для системы «ЭГУ – узел нагрузки» от 1,0 до 1,6.

Для обеспечения загрузки ЭГУ на уровне 80 % в длительном режиме работы коэффициент соизмеримости должен быть $K^* = 1$. Если $K^* < 1$, то это указывает на то, что выбранная мощность генератора приведет к перегрузке агрегата, т. е. при длительном режиме работы загрузка будет достигать 100 % и более, что не допустимо согласно ГОСТ Р 53987–2010 (ИСО 8528–1:2005).

При коэффициенте, равном 1,6, загрузка ЭГУ при длительном режиме будет составлять 50 %, что соответствует граничному значению использования и не рационально с точки зрения эксплуатации агрегата.

Таким образом, рекомендуемой областью коэффициента соизмеримости будет являться диапазон от 1,0 до 1,6. Дальнейшее увеличение коэффициента соизмеримости ($K^* > 1,6$) применительно к узлу нагрузки свидетельствует о том, что вследствие пусковых характеристик отдельных единиц нагрузки мощность генератора будет завышена в два раза и более, что говорит о предельной соизмеримости источника и отдельных нагрузок в системе. Так, в случае пря-

мого пуска единственного асинхронного электродвигателя требуемая мощность ЭГУ будет вынужденно завышена, коэффициент соизмеримости составит 1,76, а в номинальном режиме работы ЭГУ будет загружена на 45 %.

Таким образом, необходимо обеспечить, чтобы в системе «электрогенераторная установка – узел нагрузки» коэффициент соизмеримости стремился к единице.

Уменьшение мощности ЭГУ достигается за счет мероприятий по снижению пиковой мгновенной потребляемой мощности при пуске электродвигателей с применением устройств для снижения или компенсации реактивной составляющей мощности отдельных единиц нагрузки питаемой группы электроприёмников.

Перспективным направлением снижения энергетического потребления электродвигателем прежде всего является использование регулируемого частотного электропривода. Его эффективность во многом определяется обоснованным применением для конкретных технологических процессов с учетом специфики сельскохозяйственного производства и выбора оптимального способа управления [8, 9].

2.4 Учет влияния переходных процессов при пуске асинхронных электродвигателей от источника соизмеримой мощности

В автономных системах, в которых мощность системы соизмерима с мощностью отдельных нагрузок, динамическая устойчивость системы может нарушаться при нормальных режимах работы, особенно при прямом пуске асинхронных электродвигателей, которые являются основной частью нагрузки. Поэтому динамическую устойчивость такой системы необходимо проверять по условиям пуска короткозамкнутых двигателей [11].

На рисунке 2.6 показано изменение напряжения на зажимах генератора при успешном и неуспешном пуске асинхронного электродвигателя.

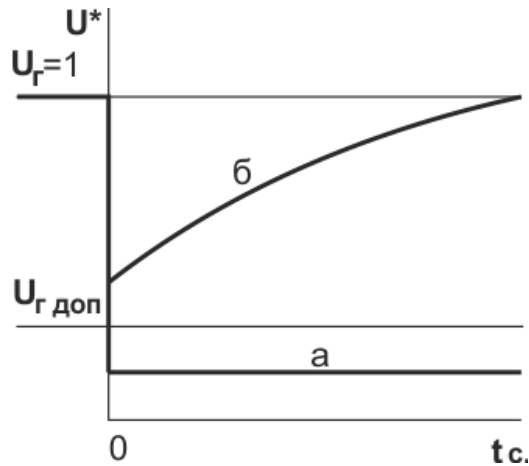


Рисунок 2.6 – Изменение напряжения генератора при пуске асинхронного электродвигателя: a – неуспешный пуск; b – успешный пуск

При пуске асинхронного двигателя от генератора соизмеримой мощности в первый момент времени напряжение на шинах генератора резко снижается от начального значения $U_{нач} = U_{Г} = 1$ до минимального $U_{мин}$ вследствие падения напряжения в переходном реактивном сопротивлении генератора при протекании в нем пускового тока двигателя. Далее напряжение может оставаться на уровне минимального или возрастет от минимального до установившегося значения, которое приблизительно может равняться начальному значению $U_{уст.} \approx U_{нач}$. В работе [11] приведены результаты экспериментального исследования процесса пуска электродвигателя от дизель-генератора. Если напряжение снижалось до $0,1U_{ном}$ и оставалось на этом уровне, пуск был неуспешным. При снижении напряжения до $0,6U_{ном}$ и его последующем возрастании пуск был успешным.

В работе [81] описаны условия для устойчивой работы асинхронных электродвигателей, питающихся от генератора соизмеримой мощности, в пусковом и установившемся режимах.

1. Минимальное значение напряжения генератора при пуске не должно быть меньше допустимого:

$$U_{\text{мин}} \geq U_{\text{Г доп}} \quad (2.10а)$$

2. Функция $U = f(t)$ должна быть монотонно возрастающей на отрезке от 0 до времени окончания пуска ($0; t_{\text{пуск}}$):

$$\frac{dU}{dt} > 0. \quad (2.10б)$$

Выполнение первого условия обеспечивается заданным соотношением мощности электродвигателя и генератора. В работе [81] приведено выражение допустимой мощности запускаемого двигателя исходя из реактивного переходного сопротивления генератора, выраженного через паспортные данные:

$$P_{\text{д.ном}} = \frac{S_{\text{Г.ном}} \eta_{\text{д.ном}} \cos \varphi_{\text{д.ном}}}{\chi_{\text{п}} \left(\frac{U_{\text{Г}}}{U_{\text{д}}} \right)^2 k_I},$$

(2.11)

где

$$\chi_{\text{п}} = \frac{x'_d}{\frac{E'_{q0}}{U_{\text{доп}}} - 1},$$

$S_{\text{Г.ном}}$, $\eta_{\text{д.ном}}$, $\cos \varphi_{\text{д.ном}}$ – номинальная полная мощность генератора, КПД двигателя, коэффициент мощности; $\chi_{\text{п}}$ – индуктивное переходное сопротивление генератора; $U_{\text{Г}}$ – напряжение на зажимах генератора; $U_{\text{д}}$ – напряжение на зажимах двигателя; k_I – кратность пускового тока двигателя; x'_d – продольное переходное сопротивление генератора; E'_{q0} – ЭДС генератора в первый момент времени работы; $U_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение при пуске электродвигателя.

Допустимые значения напряжения для двигателей, работающих в установившемся режиме, – $U_{\text{доп}} \geq 0,7U_{\text{ном}}$; для двигателей, работающих в пусковом режиме, – $U_{\text{доп}} \geq 0,8U_{\text{ном}}$.

При прочих равных параметрах допустимая мощность двигателя будет зависеть от сочетания $(\eta_{\text{д.ном}} \cos \varphi_{\text{д.ном}}) / k_{\text{д}}$.

Функция $U^* = f(t)$ выражается экспонентой [11]:

$$U^*(t) = (1 - \Omega_{\text{max}}) + \left[U_0^* - (1 - \Omega_{\text{max}}) + \frac{K_0' \Omega_{\text{max}} T_{\psi}}{K_0 T_{d0} - K_0' T_{\psi}} \right] e^{\frac{-t}{T_{d0} \frac{K_0}{K_0'}}} - \frac{K_0' \Omega_{\text{max}} T_{\psi}}{K_0 T_{d0} - K_0' T_{\psi}} e^{\frac{-t}{T_{\psi}}}, \quad (2.12)$$

где Ω_{max} – максимальное отклонение угловой скорости генератора и двигателя; U_0^* – начальное значение напряжения в относительных единицах; K_0' – коэффициент сопротивления цепи; T_{ψ} – постоянная времени первичного двигателя с учетом регулирования; T_{d0} – переходная постоянная времени генератора.

Для определения изменения напряжения $U^*(t)$ при прямом пуске двигателей необходимо полную мощность электродвигателей заменить постоянной нагрузкой, представленной сопротивлением $z_{\text{н}} = r_{\text{н}} + jx_{\text{н}}$. В свою очередь, для запускаемого электродвигателя:

$$z_I = z_{\text{д}} = \frac{\eta_{\text{д.И}} \cos \varphi_{\text{д.И}} P_{\Gamma}}{K_I \cos \varphi_{\Gamma} P_{\text{д.И}}} \left(\frac{U_{\text{д.И}}}{U_{\Gamma}} \right)^2. \quad (2.13)$$

Полное сопротивление нагрузки:

$$z_{\text{н}\Sigma} = \sqrt{x_{\text{н}} + r_{\text{н}}}. \quad (2.14)$$

Соответственно:

$$x_{\text{н}} = z_I \sin \varphi_{\text{н}} + x_{\text{с}}; \quad r_{\text{н}} = z_I \cos \varphi_{\text{н}} + r_{\text{с}}, \quad (2.15)$$

где $\cos \varphi_{\text{н}}; \sin \varphi_{\text{н}}$ – при пуске; $r_{\text{с}}, x_{\text{с}}$ – активное и ёмкостное сопротивления сети.

При запуске последующих электродвигателей с учетом наличия уже работающих выражения (2.15) примут вид:

$$x_H = \frac{z_I z_{\text{э.раб}} \sin \varphi_{\Pi} \sin \varphi_{\text{раб}}}{z_I \sin \varphi_{\Pi} + z_{\text{э.раб}} \sin \varphi_{\text{раб}}} + x_c; r_H = \frac{z_I z_{\text{э.раб}} \cos \varphi_{\Pi} \cos \varphi_{\text{раб}}}{z_I \cos \varphi_{\Pi} + z_{\text{э.раб}} \cos \varphi_{\text{раб}}} + r_c, \quad (2.16)$$

где $z_{\text{э.раб}}$ – эквивалентное сопротивление работающих электродвигателей;
 $\varphi_{\text{раб}}$ – приведенное отношение индуктивного сопротивления к активному сопротивлению работающих электродвигателей.

Коэффициент нагрузки, подключаемой на агрегат:

$$K_{\lambda} = \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{\text{ан}} P_{\Gamma}}{z_{\text{н}\Sigma} \cos \varphi_{\Gamma} P_{\text{п.д}}}, \quad (2.17)$$

где $\cos \varphi_{\text{ан}}$ – коэффициент мощности набрасываемой нагрузки с учетом активного сопротивления обмотки статора генератора.

Напряжение генератора в момент включения электродвигателя:

$$U_0^* = \frac{x_{q\Sigma} \varepsilon'_g}{(x_{q\Sigma} + x'_d)}, \quad (2.18)$$

где ε'_g – установившееся значение ЭДС; $x_{q\Sigma}$ – сопротивление нагрузки; x'_d – сопротивление генератора.

Максимальное отклонение угловой скорости:

$$\Omega_{\text{макс}} = \rho K_{\lambda} K_{\delta} \left[e^{\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0 \right)} \sin \psi_0 + \cos \psi \right] \quad (2.19)$$

при

$$\rho = \sqrt{(1 - \alpha \alpha_0) / (\beta \alpha_0)}^2 + 1, \quad (2.20)$$

где

$$\alpha_0 = K_{\delta} T_j; \alpha = K_{\delta} T_j (1 - \tau) / (2 T_{\text{мех}} T_j); \beta = \sqrt{1 / (T_{\text{мех}} T_j) - \alpha^2},$$

K_δ – степень неравномерности регулятора (у современных регуляторов составляет 0,025–0,030); K_λ – коэффициент наброса нагрузки; T_j – постоянная времени ЭГУ (генератора и двигателя); τ – время запаздывания регулирующего импульса; $T_{\text{мех}}$ – постоянная времени регулятора скорости ЭГУ.

Постоянная времени первичного двигателя с учетом регулирования:

$$T_\psi = \frac{0,4(\pi/2) - \psi + \psi_0}{\beta} \quad (2.21)$$

при

$$\psi = \arctg[(1 - \alpha\alpha_0) / (\beta\alpha_0)]; \quad \psi_0 = \arctg(\beta/\alpha). \quad (2.22)$$

Таким образом, определена особенность условий выбора ЭГУ соизмеримой мощности для узла электродвигательной нагрузки, заключающаяся в необходимости оценки факторов нарушения устойчивости, учитывающая запуск последующих электродвигателей при наличии работающих. Отсюда следует, что при оценке работы выбранного генератора необходимо выполнить исследование функции (2.11). Если функция монотонно возрастающая, то второе условие (2.9б) соблюдается и запуск самого мощного электродвигателя будет успешным. Следовательно, сформулированное условие (2.2) может быть использовано для определения мощности ЭГУ, обеспечивающей устойчивость работы системы.

2.5 Методика выбора требуемой мощности генератора для автономного электроснабжения

Методика выбора требуемой мощности ЭГУ для автономного электроснабжения электродвигательной сосредоточенной нагрузки может быть изложена в следующем порядке.

1. Определяют состав электроприемников и характеристики узла двигательной нагрузки. По паспортным данным выявляют количество, единичную мощность, КПД, коэффициент мощности и кратность пускового тока электродвигателей.

2. Анализируют технологический процесс работы оборудования. Определяют порядок запуска электродвигателей, группу одновременно включаемых электродвигателей, и коэффициент загрузки каждого электродвигателя.

3. Определяют требуемую номинальную мощность электрогенераторной установки для установившегося режима работы оборудования с учетом приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки по выражению (2.4).

4. Анализируют влияние пусковых характеристик асинхронных электродвигателей на формирование пиковой мгновенной потребляемой мощности. Выполняют расчет мощности ЭГУ по формуле (2.6) с учетом расчетных значений пусковой мощности каждого запускаемого электродвигателя в порядке запуска.

5. Сравнивают значения расчетной мощности электрогенераторной установки по системе неравенств, составленной из уравнений (2.4) и (2.6):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\text{г.ном}} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_{\text{д.}i}}{\eta_{\text{д.}i} \cos \varphi_{\text{д.}i}} K_{\text{з.срв}} + \frac{1,11k_I P_{\text{д.}I}}{\eta_{\text{д.}I} \cos \varphi_{\text{д.}I} K_L k_Q}; \\ S_{\text{г.ном}} \geq \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{д.}i}}{\eta_{\text{д.}i} \cos \varphi_{\text{д.}i}} K_{\text{з.срв}}. \end{array} \right. \quad (2.23)$$

6. Выбирают электрогенераторную установку, соответствующую по мощности.

7. Определяют соизмеримость мощности источника с мощностью узла нагрузки по выражению (2.8). Необходимо, чтобы коэффициент соизмеримости стремился к единице. Если $K^* > 1,6$, то следует уменьшить пиковую мгновенную потребляемую мощность для менее мощной ЭГУ посредством изменения порядка запуска электродвигателей в технологическом процессе или за счет применения устройств снижения или компенсации реактивной составляющей мощности повлиявшего электродвигателя для заданного узла нагрузки.

Произведем подбор ЭГУ для группы асинхронных электродвигателей серии АИР с установленной мощностью 1,5 кВт; 4,0; 5,5; 7,5 кВт и частотой вращения 1500 мин^{-1} по методике выбора требуемой мощности ЭГУ для автономного электроснабжения электродвигательной нагрузки.

Состав электроприемников и технические характеристики группы асинхронных электродвигателей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики группы асинхронных электродвигателей

Тип	P_n , кВт	КПД, %	$\cos \varphi$	I_n , А ($U = 380 \text{ В}$)	I_n / I_n
9АИР80В4	1,5	75,84	0,76	3,95	6,2
9АИР100L4	4	80,24	0,81	9,35	7
9АИР112М4	5,5	84,3	0,82	12,04	6,6
9АИР132S4	7,5	84,65	0,85	15,84	7

Группа выбранных асинхронных электродвигателей представляет собой узел двигательной нагрузки. Управление осуществляется со шкафа управления с помощью магнитных пускателей.

Определим порядок запуска электродвигателей и коэффициент загрузки каждого из них. Предположим, что электродвигатели одновременно не запускаются и отсутствует заданная последовательность порядка запуска. Тогда для определения требуемой мощности ЭГУ сформируем возможные комбинации порядка запуска данного набора электродвигателей. С учетом того, что установленная мощность узла двигательной нагрузки постоянна, а загрузка электродвигателей в установившемся режиме не зависит от порядка запуска, особое внимание уделим определению пиковой мгновенной потребляемой мощности.

Для группы электродвигателей, представленных в таблице 2.1, количество возможных перестановок вычисляется как $n!$:

$$n! = 4! = 24. \quad (2.24)$$

В комбинаторике данная операция называется факториалом натурального числа n и интерпретируется как количество перестановок (упорядочивание) множества из n элементов.

В таблице 2.2 представлены комбинации порядка запуска для выбранного набора электродвигателей.

Таблица 2.2 – Матрица комбинаций вариантов порядка запуска 4 электродвигателей

№ комбинации	Порядок запуска			
	1	2	3	4
1	7,5	5,5	4,0	1,5
2	7,5	5,5	1,5	4,0
3	7,5	4,0	5,5	1,5
4	7,5	4,0	1,5	5,5
5	7,5	1,5	5,5	4,0
6	7,5	1,5	4,0	5,5
7	5,5	7,5	4,0	1,5
8	5,5	7,5	1,5	4,0
9	5,5	4,0	7,5	1,5
10	5,5	4,0	1,5	7,5
11	5,5	1,5	7,5	4,0
12	5,5	1,5	4,0	7,5
13	4,0	7,5	5,5	1,5
14	4,0	7,5	1,5	5,5
15	4,0	5,5	7,5	1,5
16	4,0	5,5	1,5	7,5
17	4,0	1,5	7,5	5,5
18	4,0	1,5	5,5	7,5
19	1,5	7,5	5,5	4,0
20	1,5	7,5	4,0	5,5
21	1,5	5,5	7,5	4,0
22	1,5	5,5	4,0	7,5
23	1,5	4,0	7,5	5,5
24	1,5	4,0	5,5	7,5

По выражению (2.4) с учетом приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки определим требуемую номинальную мощность ЭГУ для узла электродвигательной нагрузки (см. таблицу 2.1) при установившемся режиме работы:

$$S_{Г.ном} \geq 21,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Результаты расчета требуемой мощности ЭГУ при разном порядке запуска для матрицы комбинаций (см. таблицу 3.1) представлены в приложении В.

На рисунке 2.7 в соответствии с таблицей 3.1 приведена гистограмма для запускаемых электродвигателей, влияющих на расчетную мощность ЭГУ при разном порядке запуска для матрицы комбинаций.

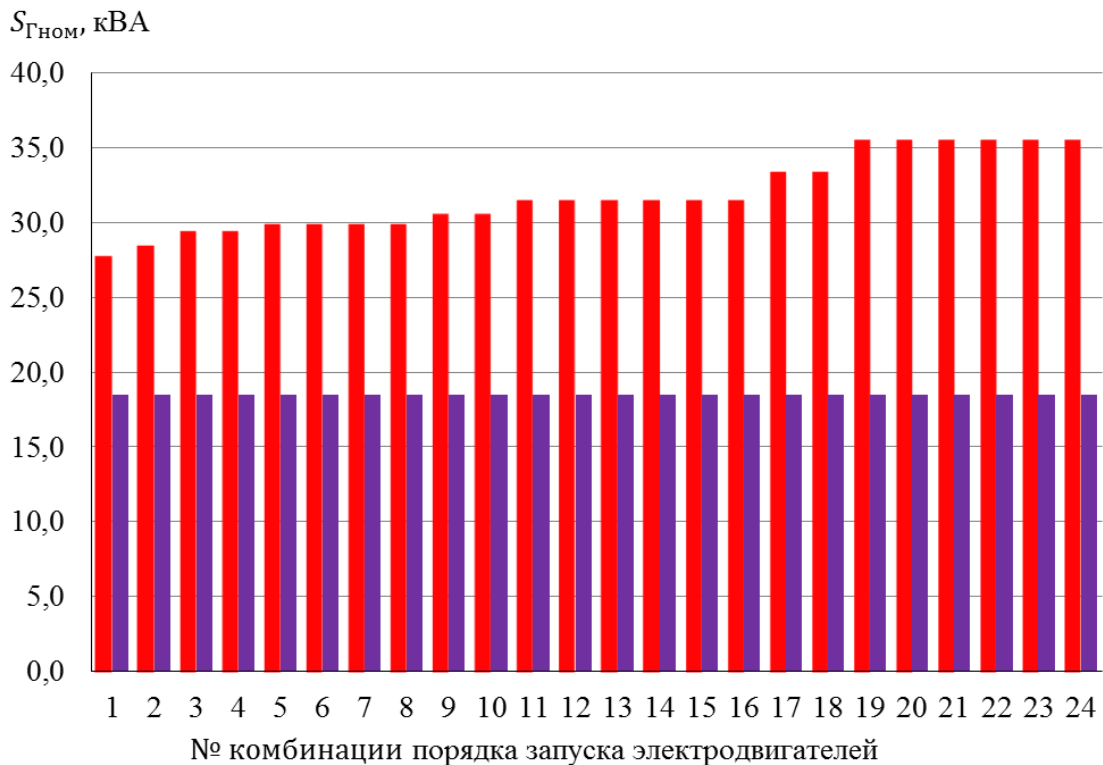


Рисунок 2.7 – Расчетная мощность ЭГУ для запускаемых двигателей:

- – расчетная мощность ЭГУ по условию для запускаемого электродвигателя по выражению (2.6);
- – расчетная мощность для установившегося режима работы узла электродвигательной нагрузки по выражению (2.4)

При разном порядке запуска мощность ЭГУ, рассчитанная по формуле (2.6) для одного набора электродвигателей, получается разной. Этот параметр складывается из базовой мощности (при установившемся режиме работы электродвигателя) и пиковой (потребляемой электродвигателем в процессе запуска), при этом большее влияние оказывает пиковая мощность. Отсюда следует подтверждение влияния порядка запуска электродвигателей, принадлежащих к одному узлу электродвигательной нагрузки. Для каждого номера

комбинации требуемая мощность ЭГУ будет своя. Таким образом, для одного узла электродвигательной нагрузки в качестве источника электроснабжения возможен выбор нескольких электрогенераторных установок.

Из полученных расчетных значений мощности в таблице 2.3 представлены шесть комбинаций порядка запуска для данного набора электродвигателей.

Таблица 2.3 – Расчетная требуемая мощность ЭГУ для запускаемых двигателей выбранных комбинаций

№ комбинации	Порядок запуска				Расчетная мощность для запускаемого двигателя, кВт·А			
	1	2	3	4	S_1	S_2	S_3	S_4
1	7,5	5,5	4,0	1,5	21,2	25,2	27,8	24,5
7	5,5	7,5	4,0	1,5	16,2	28,5	27,8	24,5
9	5,5	4,0	7,5	1,5	16,2	19,5	33,4	24,5
11	5,5	1,5	7,5	4,0	16,2	11,3	30,6	29,9
13	4,0	7,5	5,5	1,5	13,1	27,1	29,4	24,5
24	1,5	4,0	5,5	7,5	4,9	15,2	23,2	35,5

Сравнивая результаты, полученные расчетным путем по системе неравенств (2.23), выбирают большее полученное значение мощности. Например, для комбинации № 1 электродвигателем, влияющим на требуемую мощность ЭГУ, является третий, поэтому результат расчета в системе неравенств (2.23) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} S_{Г.НОМ} \geq 27,8; \\ S_{Г.НОМ} \geq 21,7. \end{cases}$$

Далее выбирают ближайшую большую мощность ЭГУ с двигателем внутреннего сгорания. В данном случае $S_{Г.НОМ} = 30 \text{ кВт} \cdot \text{А}$.

Для комбинации № 24:

$$\begin{cases} S_{Г.НОМ} \geq 35,5; \\ S_{Г.НОМ} \geq 21,7. \end{cases}$$

Ближайшая стандартная мощность выбираемой ЭГУ $S_{г.ном} = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

На рисунке 2.8 представлены номограммы для определения мощности ЭГУ с двигателем внутреннего сгорания для имеющегося мощностного ряда выпускаемых дизельных генераторов российского производства. Пример приведен для асинхронных электродвигателей (см. таблицу 2.1).

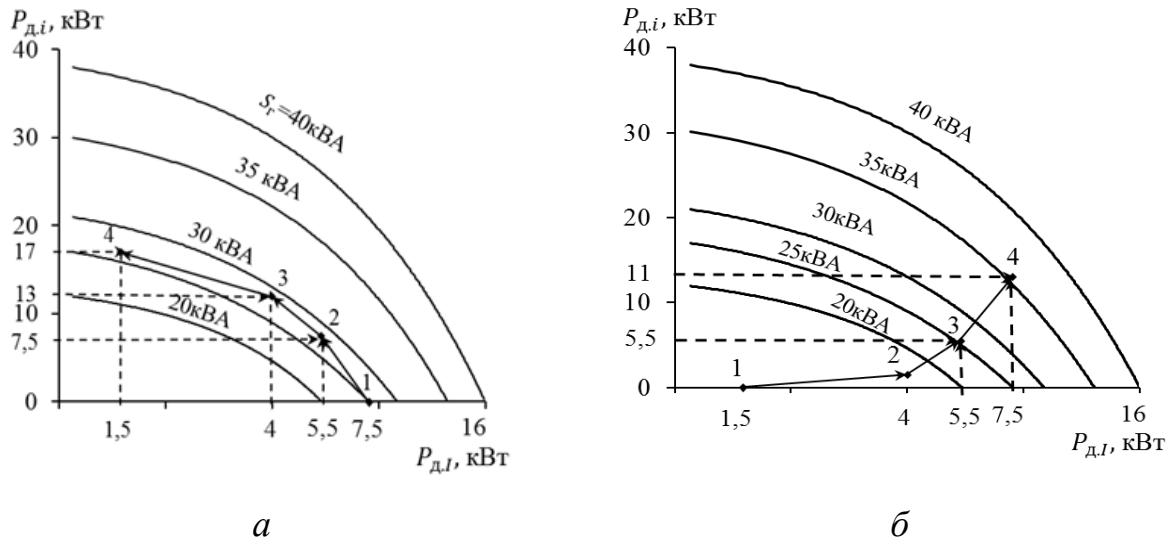


Рисунок 2.8 – Номограммы для определения мощности ЭГУ:

a – порядок запуска электродвигателей комбинации № 1; *б* – порядок запуска электродвигателей комбинации № 24; $P_{д,i}$ – мощность *i*-го работающего(их) электродвигателя(ей); $P_{д,l}$ – мощность *l*-го запускаемого электродвигателя.

Выбор мощности генератора для электроснабжения узла двигательной нагрузки можно произвести в упрощенном виде, выполняя пункты 3–5 с использованием номограммы (см. рисунок 2.8). Для этого необходимо для каждого запускаемого электродвигателя в технологическом порядке найти точки расчетной мощности на номограмме и выбрать соответствующий по мощности дизель-генератор.

Из номограмм видно, что для запускаемых электродвигателей можно выбрать ЭГУ мощностью: *a* – $S = 30 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; *б* – $S = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Оценку соизмеримости для каждого из выбранных мощностей ЭГУ выполним, используя выражение (2.8).

Для ЭГУ мощностью $S = 30 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (комбинация № 1) коэффициент соизмеримости K^* :

$$K^* = \frac{30}{21,7} \cdot 0,8 = 1,1.$$

По графику представления коэффициента соизмеримости и загрузки ЭГУ (см. рисунок 2.8) определен показатель загрузки ЭГУ $K_{з.г.}$. Загрузка составляет 75 %.

Для генератора $S = 40$ кВ·А (комбинация № 24) коэффициент соизмеримости K^* :

$$K^* = \frac{40}{21,7} \cdot 0,8 = 1,5.$$

Загрузка агрегата составила 55 %, что свидетельствует об использовании установки на половину мощности.

Если порядок запуска электродвигателей задан в технологическом процессе и при этом расчетная мощность выбираемой ЭГУ превышает в 2 раза и более мощность узла электродвигательной нагрузки, то повышения эффективности работы ЭГУ и увеличения загруженности агрегата можно добиться с помощью снижения влияния пусковых характеристик при пуске электродвигателя. В настоящее время существуют технологии и технические средства для облегчения процесса запуска асинхронных электродвигателей. Целесообразность применения устройства плавного пуска для соответствующего электродвигателя в каждой отдельной системе обосновывают исходя из поставленных целей и задач.

Обоснование необходимости снижения влияния переходных процессов при пуске электродвигателя на работу ЭГУ основано на технико-экономических расчетах и возможности применения устройств плавного пуска в каждом отдельно взятом случае. Другими словами, целесообразность применения средств уменьшения реактивной составляющей с использованием специализированных компенсаторов реактивной мощности или частотных преобразователей определяют исходя из того, насколько это будет оправданно с экономической точки зрения [9, 108].

Рассмотрим возможность уменьшения пусковых токов влияющего электродвигателя для комбинации № 24. Для двигателя 7,5 кВт применено устройство плавного пуска для снижения пускового тока. В этом случае результаты расчета требуемой мощности по системе неравенств (2.23) будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} S_{\text{Г.НОМ}} \geq 24,5; \\ S_{\text{Г.НОМ}} \geq 21,7. \end{cases}$$

Теоретически предполагаем, что есть возможность выбрать менее мощный генератор, но проверка соизмеримости показывает, что для ближайшего по мощности генератора $S = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ коэффициент соизмеримости K^* :

$$K^* = \frac{25}{21,7} \cdot 0,8 = 0,9.$$

Это свидетельствует о перегрузке ЭГУ в установившемся режиме работы. Таким образом, мощность выбираемого генератора из представленных в приложении Б составит $S = 31 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (т. е. такая же, как и для 1-й комбинации). Следует отметить, что в комбинации № 1 особое влияние на работу системы «генераторная установка – электродвигательная нагрузка» оказывает процесс запуска электродвигателя мощностью 4 кВт, и снижение пусковых токов не имеет обоснованной необходимости.

Проверку работоспособности и правильности расчета предложенной системы неравенств, а также определения требуемой мощности ЭГУ проведем по условию (2.11) устойчивой работы в пусковом и установившемся режимах асинхронных электродвигателей, питающихся от ЭГУ соизмеримой мощности. Рассмотрим условие устойчивости электродвигателей для комбинации № 1.

Для анализа режимов запуска асинхронных электродвигателей от источника соизмеримой мощности по условиям (2.23) выбран синхронный генератор, параметры которого приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Техническая характеристика синхронного генератора

$S_{Г\text{ ном}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$P_{Г\text{ ном}}, \text{кВт}$	$I_{н}, \text{А}$	$\cos \varphi$	$\eta_{г}$	x_d	x_q	x'_d	$R_{ст}, \text{Ом}$	$GD_{г}^2, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
31	25	45	0,8	0,87	1,97	0,99	0,11	0,02	2,4

Генератор вращается первичным двигателем (дизель), техническая характеристика которого дана в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Техническая характеристика двигателя

Тип	$P_{диз}, \text{кВт}$	$GD_{г}^2, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	Параметры регулирования			
			$T_{к}, \text{с}$	$\alpha_0, \text{рад.}$	K_0	τ
GMC430-32	32	1,14	0,0175	0,43	0,02	0,186

При заданных параметрах ЭГУ для каждого из запускаемых электродвигателей по формуле (2.16) определили коэффициент нагрузки, подключаемой на агрегат: $K_{\lambda 1} = 1,03$, $K_{\lambda 2} = 1,01$, $K_{\lambda 3} = 1,04$, $K_{\lambda 4} = 0,68$. При прямом пуске последнего двигателя в технологической цепочке условия запуска будут наиболее легкими.

Функция изменения напряжения $U^* = f(t)$ для последнего запускаемого электродвигателя в технологической цепочке примет вид:

$$U^* = 0,97 - 0,14e^{-2,9t} - 0,002e^{-52t}.$$

На рисунке 2.9 приведено изменение напряжения в относительных единицах при запуске каждого электродвигателя от генератора мощностью $S_{Г\text{ ном}} = 31 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

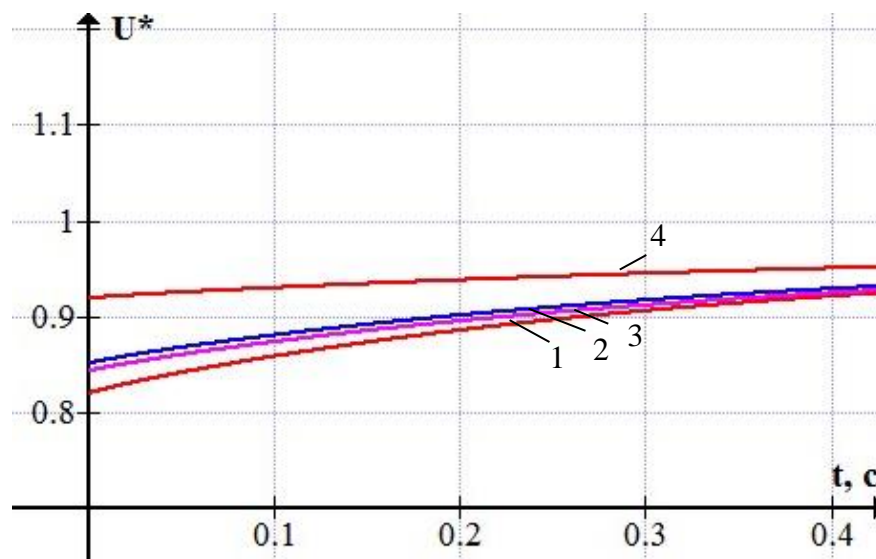


Рисунок 2.9 – Изменение напряжения за период пуска электродвигателей от ЭГУ $S_{Г\text{ ном}} = 31 \text{ кВ}\cdot\text{А}$: 1–4 порядок запуска электродвигателей (комбинация № 1)

Из графика рисунка 2.9 видно, что функция изменения напряжения $U^* = f(t)$ монотонно возрастает за период пуска электродвигателей. Таким образом, условие устойчивости (2.9б) соблюдается.

Результатом проверки по условиям устойчивой работы в пусковом и установившемся режимах асинхронных электродвигателей, питающихся от ЭГУ соизмеримой мощности, является подтверждение применимости системы неравенств (2.23) при определении требуемой мощности ЭГУ для электроснабжения электродвигательной сосредоточенной нагрузки. Из построенных кривых (см. рисунок 2.9) видно, что прямой пуск электродвигателей, питающихся от выбранного генератора, успешен при заданном порядке запуска. Это позволяет сделать вывод о том, что предложенная система неравенств (2.23) для определения требуемой мощности ЭГУ позволяет произвести расчет и подбор источника электроснабжения, учитывая рекомендуемые режимы работы ЭГУ.

На основе предложенной методики разработаны рекомендации по выбору мощности ЭГУ для средств малой механизации, широко применяемых в сельском хозяйстве, зерноочистительных комплексов (ПЗК, ОВС), зернометаллов (ЗС, ЗСМН, ПЗМ) – приложение Г.

Выводы по главе

По результатам исследований условий и особенностей запуска асинхронных электродвигателей от источника ограниченной мощности выявлено влияние очередности запуска электродвигателей на расчетную мощность ЭГУ. Определена область допустимого сочетания мощностей запускаемых электродвигателей и нагрузки на генераторе, при которых ЭГУ обеспечит их успешный запуск. Мощность очередного запускаемого электродвигателя в этой группе должна составлять не более 45 % от остаточной мощности нагружаемого генератора – $0,45(P_{г.ном} - P_{нагр})$.

Предложен параметр соизмеримости мощности источника с мощностью узла нагрузки, выраженный в виде коэффициента, с помощью которого можно оценить загрузку ЭГУ. Областью допустимых значений коэффициента соизмеримости для системы «ЭГУ – узел нагрузки» принято считать 1,0–1,6. Для обеспечения загрузки ЭГУ на уровне 80 % в длительном режиме работы коэффициент соизмеримости должен быть равен единице ($K^* = 1$). Рекомендуемый диапазон данного коэффициента – от 1,0 до 1,6.

Разработана методика выбора мощности ЭГУ с приводом от двигателя внутреннего сгорания для электроснабжения технологических процессов в сельском хозяйстве, позволяющая учитывать последовательность запуска и мощность электродвигателей в технологической цепочке и производить расчет и подбор источника электроснабжения, учитывая рекомендуемые режимы работы ЭГУ.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1 Программа экспериментальных исследований

С целью подтверждения теоретических зависимостей влияния очередности запуска электродвигателей на требуемую мощность ЭГУ разработаны программа и методика экспериментальных исследований и натурного обследования технологической системы.

Программа экспериментальных исследований включала в себя следующее.

1. Измерение значений тока и напряжения асинхронных электродвигателей, питающихся от ЭГУ, в момент пуска и в установившемся режиме работы.

2. Анализ и статистическая обработка данных, полученных в результате измерений величин тока и напряжения.

3. Подтверждение влияния процессов при пуске асинхронных электродвигателей, относящихся к одному узлу двигательной нагрузки, на устойчивость системы.

4. Натурное обследование технологического процесса, питаемого от ЭГУ соизмеримой мощности.

5. Расчет электрических нагрузок известными методами и с помощью предложенной методики. Сопоставление с результатами натурного обследования. Выбор соответствующей мощности ЭГУ.

Проведение экспериментальных исследований и статистическую обработку полученных данных осуществляли по следующему плану:

1. Выбор экспериментального оборудования.

2. Анализ точности измерения (проверка приборов).

3. Измерение электрических величин.

4. Статистическая обработка полученных данных (обработка результатов измеренных величин тока и напряжения).

Выбор факторов, влияющих на определение требуемой мощности ЭГУ, осуществлялся на анализе данных из литературных источников, и собственных наблюдений. Факторы, влияние которых уже исследовано, принимали постоянными.

Установлено, что на требуемую мощность источника питания для узла двигательной нагрузки влияют очередность запуска электродвигателей заданного узла нагрузки, а также коэффициент загрузки электродвигателей.

При проведении исследований влияния очередности запуска электродвигателей на требуемую мощность ЭГУ было принято, что коэффициент загрузки работающих электродвигателей равен 0,8.

Работы проводили только с поверенными приборами. Количество и методика проведения измерений соответствовали рекомендациям ГОСТ 33073–2014 [27].

3.2 Методика и технические средства эксперимента

Экспериментальные исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показатели системы с автономным электроснабжением обусловлены необходимостью получения полной информации о зависимости влияния очередности запуска на устойчивость электрического режима и улучшение показателей энергоэффективности ЭГУ.

Для исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показатели системы с автономным электроснабжением был разработан экспериментальный стенд, соответствующий требованиям для проведения данного эксперимента. Стенд разделен на два блока, первый блок – измерительный, состоящий из микропроцессорного регистратора электрических процессов РПМ-16-4-3 и трансформаторов тока (ТТ), второй является блоком управления порядком запуска и включает в себя программируемый логический контроллер и коммутирующую аппаратуру.

Техническая характеристика регистратора РПМ-16-4-3 представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика регистратора РПМ-16-4-3

Показатель	Значение
Напряжение питающей сети, В	100...265
Напряжение источника резервного питания, В	9...15 (переменное, постоянное)
Частота питающей сети, Гц	45...65
Диапазон измерения действующего значения переменного напряжения, В	1...400
Диапазон измерения действующего значения переменного тока, А	0...1000
Стандартный датчик с выходом по току, мА	0...20 или 4...20
Стандартный датчик с выходом по напряжению, В	0...10
Частота измеряемого напряжения, Гц	45 ... 65
Номинальная частота датчиков тока, Гц	50
Диапазон измерения температур, °С	-30...+79
Погрешность измерения напряжения, %	2
Погрешность измерения тока от наибольшей значащей величины, %	3
Частота опроса всех датчиков, с	1..3600
Количество каналов напряжения	4
Количество каналов тока	3
Количество температурных каналов	2
Количество каналов, имеющих стандартные входы по току	1
Количество каналов, имеющих стандартные входы по напряжению	1
Количество цифровых каналов	5
Тип каналов напряжения	дифференциальный вход
Тип датчика температуры	NTC-10К-В
Тип датчика тока	стандартный токовый трансформатор с выходом 5 А типа ТОП-0,66 или ТШП-0,66
Внешний накопитель	USB-flash диск
Ёмкость внешнего накопителя	2 Гб
Файловая система	FAT-16
Формат файла для хранения данных	текстовый с расширением TXT
Соотношение ёмкость/время	≈ 550 кБ/ч
Максимальный размер файла, Мб	16
Климатическое исполнение	УХЛ3.1
Диапазон рабочих температур, °С	0...+45
Габаритные размеры, мм	157×85×55

Принцип работы регистратора основан на получении информации со всех датчиков, накоплении данных во внутренней памяти и записи на съемный носитель через USB-порт. Просмотр данных осуществляется с использованием текстового редактора и программы Reg_RPM.

Для одновременной регистрации мгновенных значений напряжения $u = f(t)$, тока $i = f(t)$ использована плата аналого-цифрового преобразователя АЦП.

В соответствии с поставленной задачей выявления влияния запускаемого электродвигателя на требуемую мощность ЭГУ исследования проводили по однофакторному методу, что позволило чётко вычленять факторы, воздействующие на зависимую переменную. Для подтверждения теоретических исследований были выбраны шесть случайных комбинаций и сведены в матрицу эксперимента (таблица 3.2). Каждой комбинации соответствовал теоретически определенный показатель мощности, влияющий на процесс запуска.

Таблица 3.2 – Матрица эксперимента

№ комбинации	Порядок запуска				Проверяемый (теоретически определенный) влияющий порядок запуска			
	1	2	3	4	S_1	S_2	S_3	S_4
1	7,5	5,5	4,0	1,5			+	
7	5,5	7,5	4,0	1,5		+		
9	5,5	4,0	7,5	1,5			+	
11	5,5	1,5	7,5	4,0			+	
13	4,0	7,5	5,5	1,5			+	
24	1,5	4,0	5,5	7,5				+

Методы измерений, установленные в государственном стандарте, предусматривают проведение независимых измерений в каждом канале, за исключением измерений несимметрии напряжений, которые проводятся только в трехфазных системах электроснабжения. Измерения тока могут быть проведены в каждом проводе электрической сети [27].

Экспериментальный стенд апробирован на кафедре «Природообустройство, строительство и теплоэнергетика» Саратовского

ГАУ им. Н.И. Вавилова. Были сформулированы требования и условия проведения измерений и обработки полученных данных.

Функциональная схема и общий вид экспериментального стенда для исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показатели системы (пусковой ток, напряжение и др.) показаны на рисунках 3.1 и 3.2 соответственно.

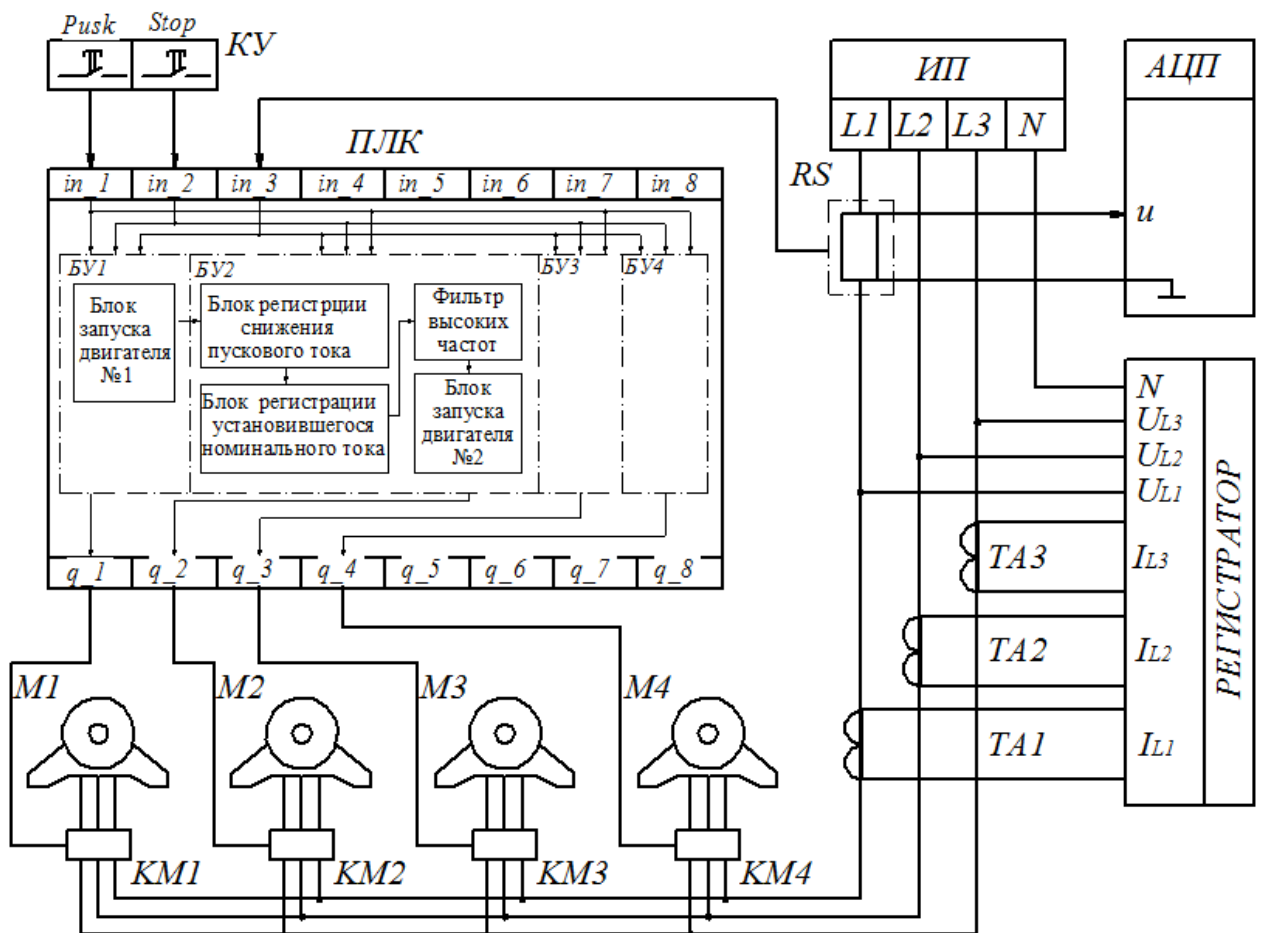


Рисунок 3.1 – Функциональная схема экспериментального стенда для исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показатели системы:

КУ – кнопки управления; *ПЛК* – программируемый логический контроллер;

БУ1...БУ2 – блок управления; *М1...М4* – электродвигатель;

КМ1...КМ4 – коммутационные элементы; *RS* – измерительный шунт;

ЭГУ – электрогенераторная установка; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *ТА1...ТА3* – трансформатор тока



Рисунок 3.2 – Общий вид экспериментального стенда для исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показатели системы:
 1 – регистратор РПМ-16-4-3 ; 2 – компьютер; 3 – электродвигатели;
 4 – программируемый логический контроллер

Преобразование значений тока i по фазам двигателя во входной сигнал напряжения u аналого-цифрового преобразователя АЦП обеспечивается стандартным измерительным шунтом RS . Тогда с учетом постоянной k_1 :

$$i = k_1 u, \quad (3.1)$$

где k_1 – постоянная, определяемая номиналом измерительного шунта.

Значения аналого-цифрового преобразователя АЦП обрабатываются таблицами *Excel Microsoft Office*, где выполняется построение переходных характеристик.

Система управления (см. рисунок.3.1) выполнена на программируемом логической контроллере ПЛК и позволяет осуществлять автоматический пуск $M1...M4$ с заданной последовательностью (определяется оператором при программировании).

Пуск первого электродвигателя $M1$ производится нажатием кнопки управления КУ (push) и подачей сигнала на дискретный вход in_1 програм-

мируемого логического контроллера ПЛК (функция реализуется в блоке запуска двигателя № 1 – БУ1). Тогда на дискретном выходе q_1 контроллера формируется управляющий сигнал для КМ1.

Условием включения следующего ЭД (например, М2) является снижение пускового тока $I_{\text{пуск}}$ первого двигателя до номинального $I_{\text{ном}}$, которое осуществляется с помощью управляющего аналогового сигнала от измерительного шунта RS на входе in_3 и блока управления БУ2 контроллера, содержащего следующие структурные элементы: блок регистрации снижения пускового тока, блок регистрации установившегося номинального тока, фильтр высоких частот, блок запуска двигателя № 2.

Далее, по рассмотренному выше алгоритму происходит последовательный пуск остальных электродвигателей – М3, М4 (см. рисунок 3.1). Остановка электродвигателей осуществляется нажатием кнопки КУ (stop).

3.3 Разработка логической схемы управления для программирования логического контроллера

Для технической реализации предложенного алгоритма последовательного запуска многодвигательного механизма с электроснабжением от генераторной установки важными являются разработка и проверка логической схемы управления для программирования логического контроллера ПЛК.

Программирование логического контроллера осуществляется в среде CoDeSys, которая является функционально полным инструментом программирования МЭК 61131-3 [10, 69, 80]. В качестве языка программирования использован язык SFC – непрерывные функциональные схемы.

Важная операция при программировании – объявление имен глобальным входам и выходам логического контроллера, ошибка в которой не обеспечит правильную работу всей системы (рисунок 3.3):

- дискретные входы: in_1 – pusk (кнопка управления КУ запуском многодвигательного механизма); in_2 – stop (кнопка управления КУ остановкой многодвигательного механизма);
- аналоговый вход: in_3 – tok_dvig (непрерывный сигнал напряжения с измерительного шунта);
- дискретные выходы: q_1 – M1; q_2 – M2; q_3 – M3; q_4 – M4 (коммутационные элементы электродвигателей M1...M4).

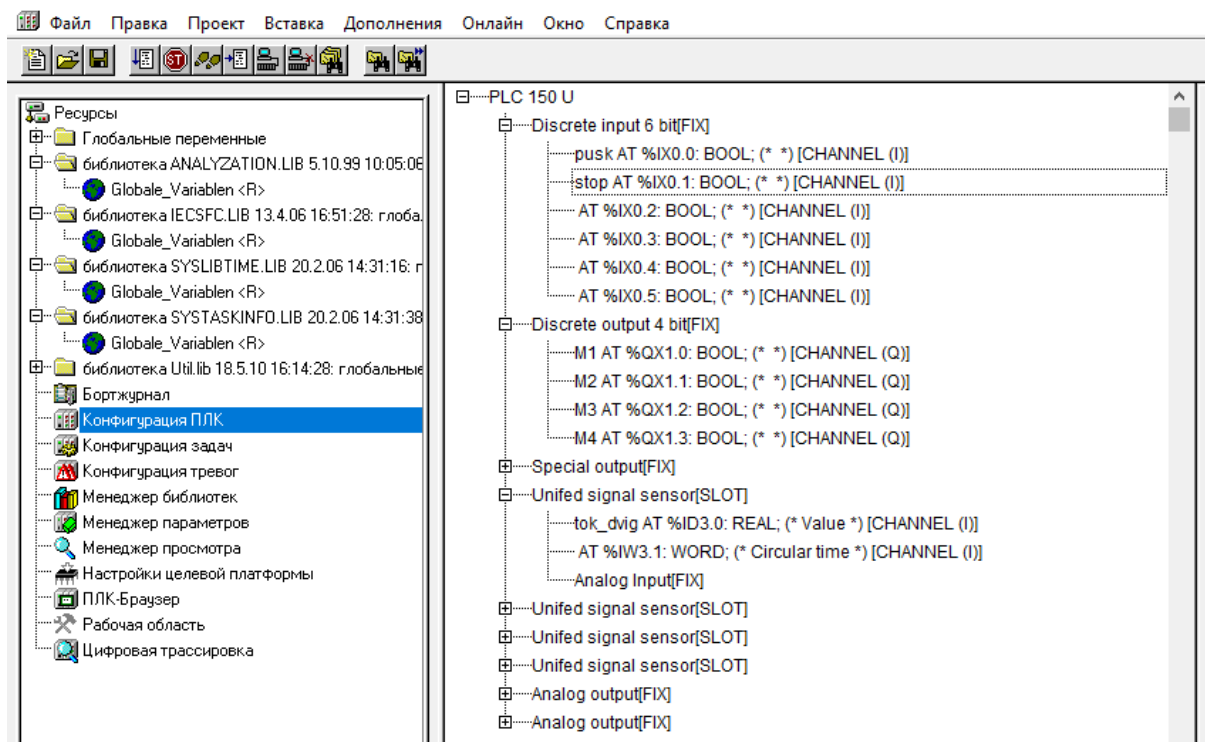


Рисунок 3.3 – Объявление имен глобальным входам и выходам

С учетом рекомендаций [10, 69, 80] и рисунка 3.1 разработана логическая схема управления заданной последовательностью автоматического пуска многодвигательного механизма при питании от автономного источника – электрогенераторной установки ЭГУ (рисунок 3.4).

При нажатии на кнопку «пуск» на дискретном входе in_1 (pusk) логического контроллера формируется сигнал TRUE (логическая единица), который подается на вход SET функционального блока RS_trig1 (см. рисунок 3.4)

[80]. Тогда на его выходе Q1 устанавливается TRUE, включая дискретный выход q_1 (M1) с подключенным к нему электродвигателем M1.

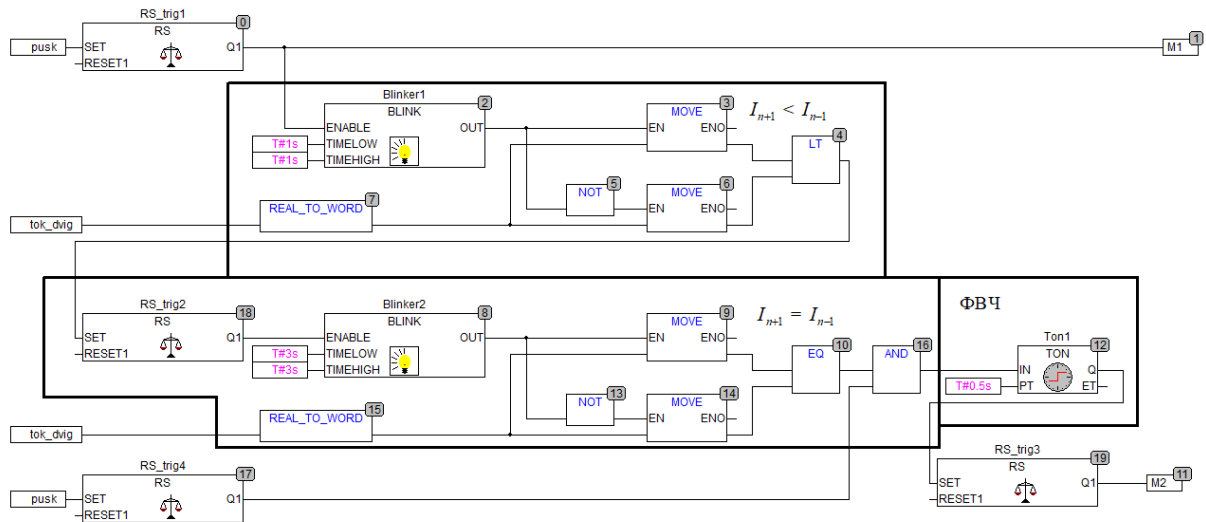


Рисунок 3.4 – Логическая схема управления заданной последовательностью автоматического пуска многодвигательного механизма, выполненная на языке CFC с использованием библиотек CoDeSys

На аналоговый вход ПЛК in_3 (tok_dvig) непрерывно подается сигнал напряжения типа REAL от измерительного шунта, соответствующий мгновенным значениям тока двигателей [80].

Одновременно с двигателем M1 включается блок регистрации снижения пускового тока ($I_{n+1} < I_{n-1}$), подается сигнал TRUE на вход ENABLE функционального блока Blinker1, который формирует на выходе OUT прямоугольные импульсы со временем паузы TIMELOW и временем импульса TIMEHIGH (задаются при программировании) (рисунок 3.5).

Таким образом, для установления начала снижения пускового тока регистрируются его значения через равные промежутки времени, которые подаются от входа in_3 (tok_dvig) на входы блоков MOVE, осуществляющие присвоение значений одной переменной другой соответствующего типа, т. е. при входе EN=TRUE, значение переменной in_3 (tok_dvig) будет присвоено выходам функциональных блоков MOVE.

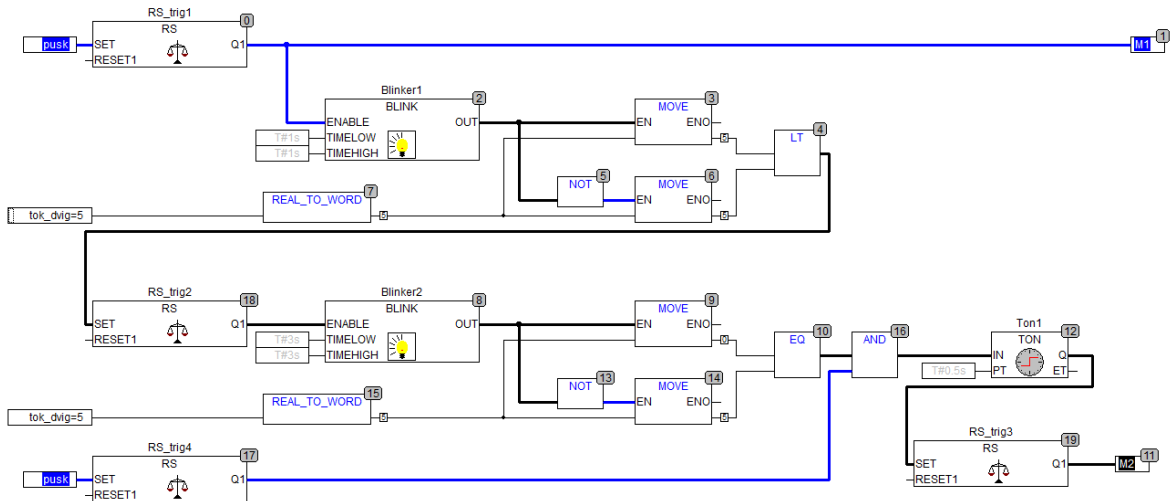


Рисунок 3.5 – Эмуляция работы логической схемы при запуске первого двигателя М1

Сравнение предыдущего значения тока I_{n-1} и последующего I_{n+1} осуществляется в функциональном блоке LT (меньше) – двоичном операторе, устанавливающим TRUE на выходе, если значение первого параметра меньше второго. Так, например, при запуске двигателя и росте тока на первом входе блока LT формируется значение tok_dvig на уровне I_{n-1}^ϕ , зарегистрированном в момент времени t_{n-1}^ϕ (рисунок 3.6). Тогда через $t_{\text{опр}}$ в момент времени t_{n+1}^ϕ установится ток $I_{n+1}^\phi > I_{n-1}^\phi$, что не позволит переключить выход блока LT с FALSE (логический ноль) на TRUE.

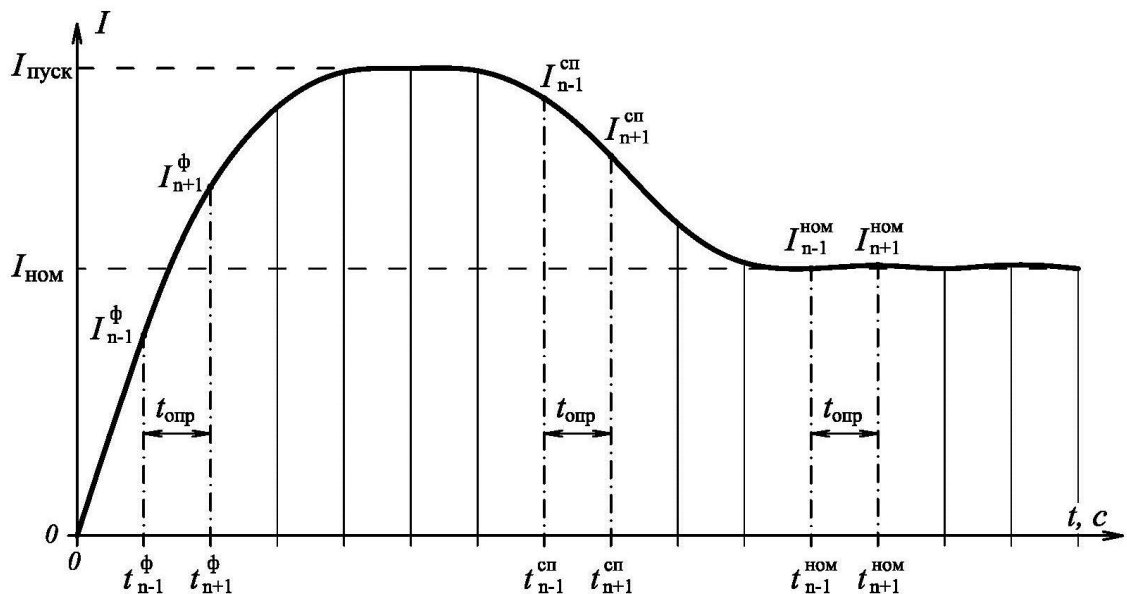


Рисунок 3.6 – Диаграмма изменения тока при запуске электродвигателя

Условием включения блока LT и запуск блока регистрации установившегося номинального тока ($I_{n+1} = I_{n-1}$) является начало спада пускового тока двигателя, когда I_{n+1}^{cp} в момент времени t_{n+1}^{cp} становится меньше I_{n-1}^{cp} за предыдущий опрос t_{n-1}^{cp} , т. е. $I_{n+1}^{cp} < I_{n-1}^{cp}$ (см. рисунок 3.6).

Блок регистрации установившегося номинального тока ($I_{n+1} = I_{n-1}$) работает аналогично блоку регистрации снижения пускового тока ($I_{n+1} < I_{n-1}$). При этом условием включения двигателя M2 (q_2) являются равные значения токов $I_{n+1}^{HOM} = I_{n-1}^{HOM}$, регистрируемые соответственно в t_{n+1}^{HOM} и t_{n-1}^{HOM} (рисунок 3.7).

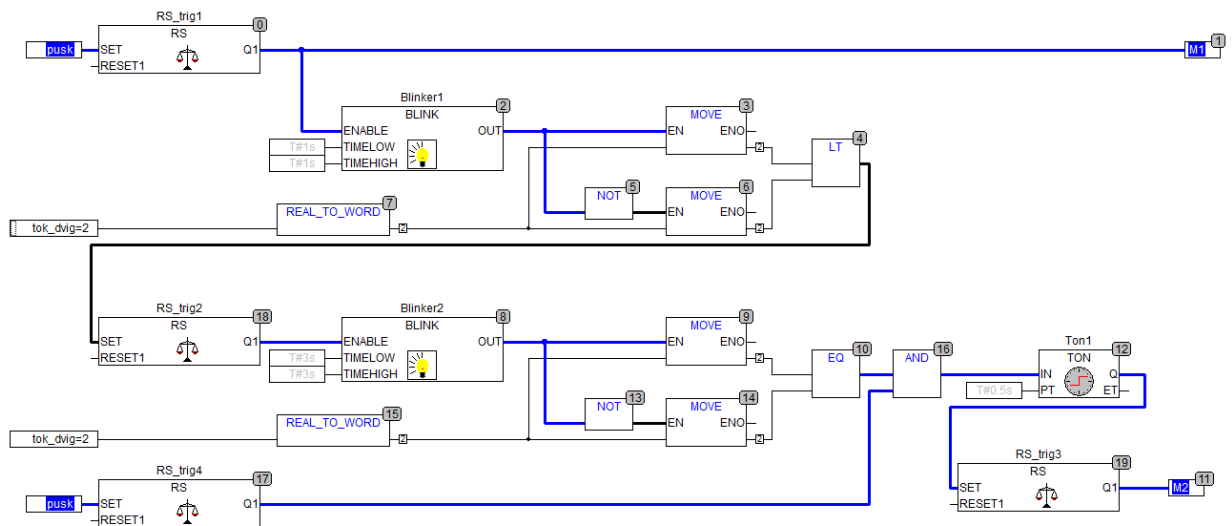


Рисунок 3.7 – Эмуляция работы логической схемы при запуске второго двигателя M2

Сравнение сигналов I_{n+1}^{HOM} и I_{n-1}^{HOM} осуществляется в функциональном блоке EQ (равно) – двоичном операторе, устанавливающим TRUE, если значение первого параметра равно второму.

Для обеспечения устойчивой работы автоматической системы управления и исключения ложных срабатываний при кратковременном снижении пускового тока предусмотрен фильтр высоких частот ФВЧ (см. рисунок 3.4), выполненный на функциональном блоке «таймер с отсрочкой включения» TON (приложение Д) [80].

Запуск остальных электродвигателей происходит аналогично (на логической схеме не показано).

Разработанная логическая схема автоматического управления (см. рисунок 3.4) позволяет осуществлять последовательный пуск любого количества электродвигателей, число которых может быть ограничено только количеством дискретных выходов самого ПЛК. При этом универсальность данной управляющей системы состоит, в частности, в том, что конфигурация функциональных блоков схемы не зависит от мощности подключаемых двигателей.

Соблюдая исходные данные и условия эксперимента, определяют расчетную мощность ЭГУ по измеренным величинам. Результаты расчетов полной матрицы (см. таблицу 3.2) представлены в приложении В.

3.4 Объект натурного исследования

В качестве объекта двигательной нагрузки для натурного исследования выбрана одна из самых распространенных в сельском хозяйстве зерноочистительная машина ОВС-25 (очиститель вороха самоходный). Предназначена для очистки зернового вороха, крупяных, колосовых, зернобобовых культур, пшеницы, ячменя, кукурузы, сорго, подсолнечника, семян рапса и т.д., от примесей на открытых токах во всех сельскохозяйственных зонах страны. Также ОВС-25 производит предварительную очистку семян сахарной свеклы и клешевины на специальных приспособлениях.

ОВС-25 является мобильной зерноочистительной машиной и при необходимости может быть перевезена на другой ток, зерносклад или вообще в другое хозяйство. В отличие от других зерноочистительных машин, она может самостоятельно без помощи зернометателей, погрузчиков, и других приспособлений производить погрузку зерна в кузов автомашины или прицепа.

Скребок питатели ОВС-25 захватывают зерновой материал и подводят к подъемной трубе загрузчика, который поднимает его в распределительный шнек питающего устройства. Последнее распределяет зерно по ши-

рине камеры. Распределитель делит материал на две равные части и направляет его в воздушные каналы. Воздушный поток через вентилятор-пылеотделитель уносит легкие примеси в пневмотранспортер. Более крупный материал из воздушного потока улавливает отстойная камера. Зерновой материал, прошедший очистку воздухом и разделенный на две равные части, попадает на верхний и нижний станы.

Очиститель вороха самопередвижений ОВС-25 состоит из следующих основных узлов (рисунок. 3.8): рамы 1; механизма самопередвижения 2; загрузочного транспортера 3; двух скребковых питателей 4; аспирации 5; вентилятора 6; пылеотделителя 7; пневмотранспортера 8; отгрузочного транспортера с приемным шнеком 9; двух решетных станов 10; механизма привода щеток 11; надставки шнека фуражных отходов 12 и щита управления 13.

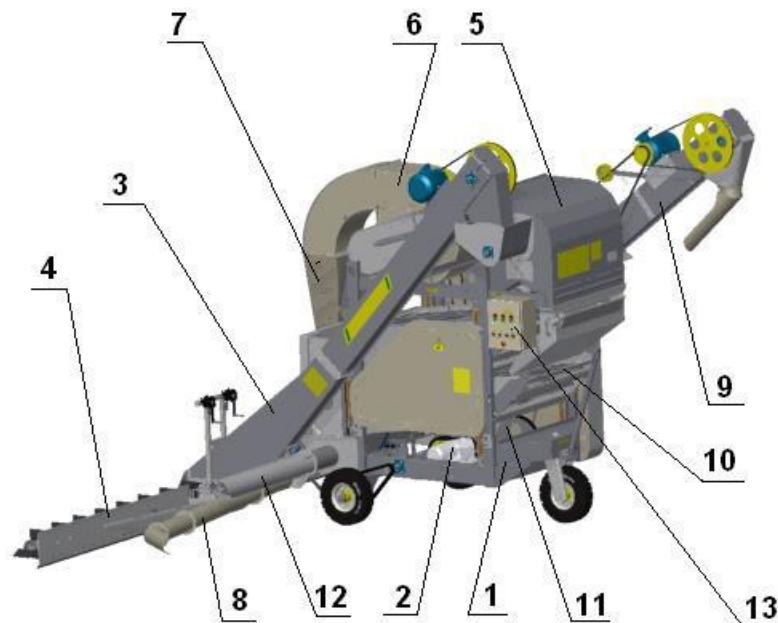


Рисунок 3.8 – Очиститель вороха самопередвижной ОВС-25:

- 1 – рама; 2 – механизм самопередвижения; 3 – загрузочный транспортер;
- 4 – скребковые питатели; 5 – аспирация; 6 – вентилятор; 7 – пылеотделитель;
- 8 – пневмотранспортер; 9 – отгрузочный транспортер с приемным шнеком;
- 10 – решетный стан с кассетой; 11 – механизм привода щеток;
- 12 – надставка шнека фуражных отходов; 13 – щит управления

Привод вращающихся элементов очистителя осуществляется посредством ременных и цепных передач, а привод станков – от эксцентрикового вала. Все рабочие органы очистителя смонтированы на сварной раме.

Техническая характеристика ОВС-25 представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Техническая характеристика ОВС-25

Показатель	Значение
Марка	ОВС-25
Тип	самопередвижной
Производительность по пшенице за 1 ч основного времени, т, не менее	
при предварительной очистке (содержание сорной примеси 10 %, влажность – 20 %)	25
при первичной очистке (содержание примесей 10 %, в том числе сорной – 3 %, влажность 16 %, плотность 760 кг/м ³)	12
Масса агрегата с комплектом сменных решет, кг, не более	1956
Масса агрегата, снаряженной для выполнения одной операции, кг	1840
<i>Воздушная часть</i>	
Тип вентилятора	пылевой
Диаметр крыльчатки вентилятора, мм	530
Количество крыльчаток	1
Число лопастей	6
Длина лопастей, мм	242
Частота вращения крыльчатки вентилятора, мин ⁻¹	1180±10 %
Поперечное сечение воздушного канала, мм	
первого	130×900
второго	130×960
<i>Решетные станы</i>	
Количество	2
Схема работы	параллельная
Амплитуда колебаний, мм	7,5
Частота колебаний, мин ⁻¹	490
Угол наклона решет, град.	8±1
Число щеток для очистки решет	24
Амплитуда колебаний щеток, мм	128
Частота колебаний щеток, мин ⁻¹	40
Количество решет, установленных в машине	8
Длина решетного полотна, мм	790
Ширина решетного полотна, мм	990
<i>Загрузочный транспортер</i>	
Число питателей	2
Частота вращения головки вала, мин ⁻¹	360
Число скребков	28

Окончание таблицы 3.3

Показатель	Значение
Скорость перемещения скребков питателя, м/с	0,7
Количество скребков питателя	16
<i>Отгрузочный транспортер</i>	
Количество скребков	28
Частота вращения шкива, мин ⁻¹	360
<i>Электродвигатели</i>	
Двигатель 4А100L4УЗ (привод машины)	
количество	1
мощность, кВт	4,0
синхронная частота вращения, мин ⁻¹	1500
Двигатель 4А100L6УЗ (привод загрузчика и отгрузчика)	
количество	2
мощность, кВт	2,2
синхронная частота вращения, мин ⁻¹	1000
Двигатель 4А80В6УЗ (привод редуктора передвижения)	
количество	1
мощность, кВт	1,1
синхронная частота вращения, мин ⁻¹	1000
Транспортный просвет, мм	190
Рабочая скорость, м/ч	9,5

С точки зрения электроснабжения ОВС-25 представляет собой узел двигательной нагрузки, состоящий (см. рисунок 3.4) из щита управления, трех двигателей, мотор-редуктора и кабельной обвязки. Электрооборудование предназначено для запуска и останова двигателей и управления рабочим и транспортным режимами механизма самопередвижения.

Энергетические показатели ОВС-25 даны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Энергетические показатели ОВС-25

Показатель	Значение
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток, А	25
Номинальный ток уставки аппарата на вводе, А	20
Номинальная мощность, кВт	9,5
Частота сети, Гц	50
Количество фаз	3
Количество электродвигателей, шт.	4

В таблице 3.5 приведены паспортные данные установленных электродвигателей.

Таблица 3.5 – Паспортные данные установленных электродвигателей

Тип двигателя	Номинальные показатели					$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{min}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$
	мощность, кВт	частота вращения, мин ⁻¹	ток статора при $U = 380 \text{ В}$, А	КПД, %	cos φ				
4А100L4У3	4,0	1430	8,6	84,0	0,84	6,0	2,0	1,6	2,4
4А100L6У3	2,2	950	5,65	81,0	0,73	5,0	2,0	1,6	2,2
4А100L6У3	2,2	950	5,65	81,0	0,73	5,0	2,0	1,6	2,2
4А80В6У3	1,1	920	3,5	74,0	0,74	4,0	2,0	1,6	2,2

По общепринятой методике для автономных источников была определена расчетная мощность для данного узла электродвигательной нагрузки. Она составляет 22 кВ·А.

По предлагаемой методике расчета требуемой мощности генератора расчетная мощность ЭГУ равна 14,4 кВ·А. Данному условию удовлетворяет агрегат ЭД12-Т400 с синхронным генератором ДГС 81/4-У2,1М и первичным двигателем 9Р4-6У2 (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Техническая характеристика ЭГУ ЭД12-Т400

Показатель	Значение
Мощность трехфазная, кВ·А	15
Напряжение, В	400
Марка двигателя	9Р4-6У2
Расход топлива, л/ч	5
Уровень шума, дБ	73
Пуск	ручной
Габаритные размеры, мм	3865×2065×2235
Масса, кг	75

При проведении сравнительного натурного исследования источников питания для электроснабжения ОВС-25 дополнительно выбран бензогенератор EB13,5/400 мощностью 13,5 кВ·А. Данный генератор выбран из условия, что будет покрывать требуемую мощность в установившемся режиме работы электродвигателей с коэффициентом загрузки, равным единице. Для ОВС-25 $S_{\text{нагр}\cdot\text{уст}} = 11,8 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

Для корректности эксперимента целенаправленно был выбран бензогенератор меньшей мощности с учетом того, что при определенных условиях и возможности изменения порядка запуска или применения дополнительного оборудования для снижения пусковых токов асинхронных электродвигателей обеспечивается работоспособность системы автономной электрогенераторной установки с подключенной к ней электродвигательной нагрузкой.

Техническая характеристика бензогенератора представлена в таблице 3.7, а приводного двигателя внутреннего сгорания – в таблице 3.8. Бензогенератор укомплектован ручным запуском. Приводной двигатель внутреннего сгорания оснащен аварийной системой защиты по уровню масла: при снижении уровня масла в картере двигателя ниже допустимого двигатель останавливается, обеспечивая защиту от поломки.

Таблица 3.7 – Техническая характеристика бензогенератора EB13,5/400-S

Показатель	Значение
Мощность трехфазная, кВ·А	13,5
Напряжение, В	380
Марка двигателя	Robin-Subaru EX40D
Расход топлива, л/ч	2,6
Вместимость топливного бака, л	7
Уровень шума, дБ	73
Пуск	ручной
Габаритные размеры, мм	835×550×540
Масса, кг	75

Таблица 3.8 – Техническая характеристика бензинового двигателя

Показатель	Значение
Диаметр цилиндра × ход поршня, мм	89×65
Рабочий объем, см ³	404
Максимальная выходная мощность, кВт (л. с.) / мин ⁻¹	Net: 8,8(12,0)/3600 Gross: 10,3(14,0)/3600
Номинальная выходная мощность, кВт (л. с.) / мин ⁻¹	6,3(8,5)/3000 7,0(9,5)/3600
Максимальный крутящий момент, Н·м (кгс·м) / мин ⁻¹	Net: 27(2,75)/2400 Gross: 28,5 (2,91)/2400
Топливо	автомобильный неэтилированный бензин
Вместимость топливного бака, л	6,8
Смазка	моторное масло SAE 10W-30, 20W, 30W
Объем емкости для смазочного масла, л	1,2
Система зажигания	транзисторная
Система пуска	стартер обратного хода (электрический стартер в качестве опции)
Сухая масса, кг	33
Габаритные размеры, мм	389×446×447

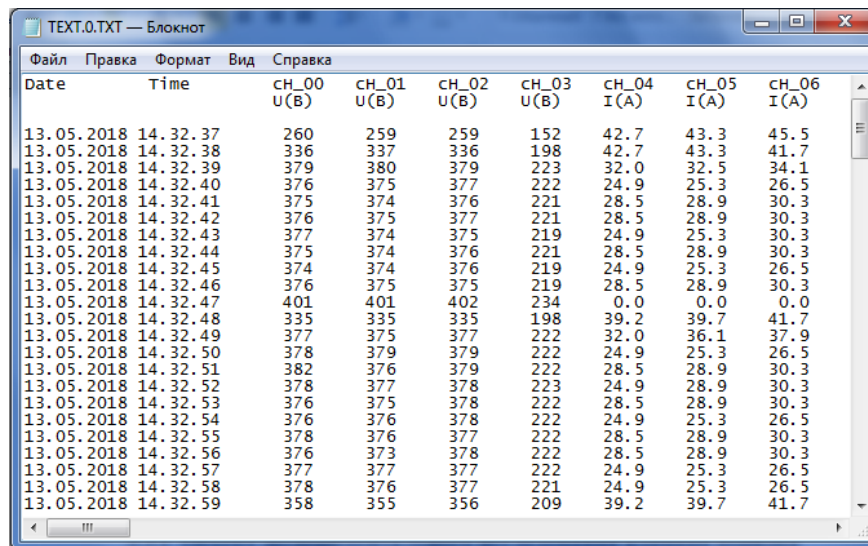
Выбранные в качестве объекта двигательной нагрузки для натурного обследования зерноочистительная машина ОВС-25 и две электрогенераторные установки позволили подтвердить теоретический подход к определению требуемой мощности ЭГУ для электропитания узла электродвигательной нагрузки.

В работе принято, что расстояние от источника до потребителя в автономной системе с применением ЭГУ не является значительным и потери в линии составят не более 5 %.

Подготовку к работе, подключение потребителя(ей) и запуск электрогенератора производили в соответствии с инструкцией по эксплуатации [3].

3.5 Методика обработки статистических данных

Для анализа результатов измерений величин тока и напряжения с помощью измерительного комплекса останавливают запись и извлекают внешний накопитель. Формат файла представлен на рисунке 3.9.



Date	Time	CH_00 U(B)	CH_01 U(B)	CH_02 U(B)	CH_03 U(B)	CH_04 I(A)	CH_05 I(A)	CH_06 I(A)
13.05.2018	14.32.37	260	259	259	152	42.7	43.3	45.5
13.05.2018	14.32.38	336	337	336	198	42.7	43.3	41.7
13.05.2018	14.32.39	379	380	379	223	32.0	32.5	34.1
13.05.2018	14.32.40	376	375	377	222	24.9	25.3	26.5
13.05.2018	14.32.41	375	374	376	221	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.42	376	375	377	221	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.43	377	374	375	219	24.9	25.3	30.3
13.05.2018	14.32.44	375	374	376	221	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.45	374	374	376	219	24.9	25.3	26.5
13.05.2018	14.32.46	376	375	375	219	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.47	401	401	402	234	0.0	0.0	0.0
13.05.2018	14.32.48	335	335	335	198	39.2	39.7	41.7
13.05.2018	14.32.49	377	375	377	222	32.0	36.1	37.9
13.05.2018	14.32.50	378	379	379	222	24.9	25.3	26.5
13.05.2018	14.32.51	382	376	379	222	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.52	378	377	378	223	24.9	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.53	376	375	378	222	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.54	376	376	378	222	24.9	25.3	26.5
13.05.2018	14.32.55	378	376	377	222	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.56	376	373	378	222	28.5	28.9	30.3
13.05.2018	14.32.57	377	377	377	222	24.9	25.3	26.5
13.05.2018	14.32.58	378	376	377	221	24.9	25.3	26.5
13.05.2018	14.32.59	358	355	356	209	39.2	39.7	41.7

Рисунок 3.9 – Формат текстового файла

С помощью программы «Регистратор РПМ 16-4-3» обрабатывают и анализируют информацию, накопленную устройством, а также просматривают данные в виде графиков.

При запуске программы «Регистратор РПМ 16-4-3» появляется всплывающее окно (рисунок 3.10). В его верхней части располагается главное меню, чуть ниже – панель управления с областью отображения данных, состоящая из 2 вкладок. На первой вкладке отображаются данные о выбранных файлах, на второй – сам график. Главное меню объединяет в себе все функции программы, которые могут быть выбраны по любому из пунктов меню.

При выделении нужного файла для отображения программа начинает его анализировать, после чего появляется информация с датой и временем начала записи, датой и временем окончания записи, номером записываемых каналов (см. рисунок 3.10).

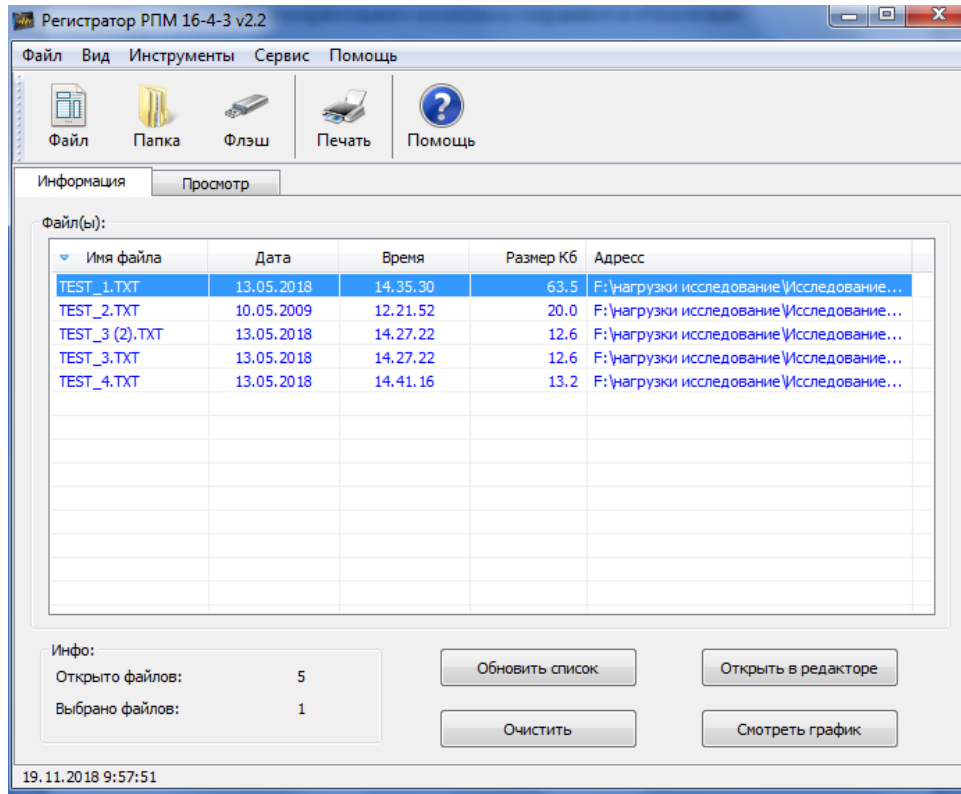


Рисунок 3.10 – Главное окно программы «Регистратор РПМ 16-4-3»

Для выбранного файла активна кнопка «Смотреть график», после нажатия на которую программа проанализирует файл и откроет вкладку просмотра графика. В программе можно задать только 5 одновременно просматриваемых каналов. С помощью панели инструментов можно сдвигать график, увеличивать его, уменьшать и т. д.

Рассматривая экспериментальные данные, полученные в ходе измерений электрических величин, как генеральную совокупность, нам неизвестен либо закон ее распределения, либо параметры распределения. В подобных случаях в математической статистике выдвигают некоторое предположение относительно свойств генеральной совокупности. Данное предположение называют «статистическая гипотеза».

Статистическая гипотеза может быть проверена на основании результатов случайной выборки. Правило, устанавливающее условия, при которых проверяемая гипотеза принимается или отвергается, называется статистическим критерием. В математической статистике наиболее распространенными

являются следующие критерии: Стьюдента, Фишера (эти критерии исходят из предположения о близости эмпирического распределения признака X к нормальному закону распределения), χ^2 Пирсона, Колмогорова, Смирнова Романовского, Ястремского и др. (эти критерии применяют для проверки близости эмпирического распределения признака X к нормальному или другим распределениям, когда не используются конкретные значения параметров этих распределений) [31].

Обработка экспериментальных данных с помощью любого критерия осуществляют по следующей схеме.

1. Берется один или два ряда наблюдений (одну или две выборки) и по элементам этих рядов по определенным формулам (для каждого критерия они свои) вычисляется статистика.

2. По заданному уровню значимости α и числу степеней свободы k находят по таблицам граничные значения для полученной статистики.

3. Если полученная статистика не выходит за пределы найденных границ, то принимают утверждение: «Нет достаточных оснований отвергнуть выдвинутую гипотезу» [28]. При обратном результате гипотезу отвергают.

Многочратно доказано, что электрические нагрузки можно рассматривать как случайную величину, подчиняющуюся нормальному закону распределения.

Для проверки отклонения распределения вероятностей от нормального распределения при независимых наблюдениях обработку экспериментальных данных, полученных в ходе научных исследований, проводили по методике [28].

Многосторонние критерии применяют в случае, если нет априорной информации о типе отклонения от нормального распределения.

Критерий Шапиро – Уилка позволяет проводить анализ полученных данных в пределах $8 \leq n \leq 50$; или в малой выборке ($n \leq 8$) для определения отклонения от нормального распределения.

Данный критерий типа дисперсионного анализа для полной выборки основан на регрессионном анализе порядковых статистик по их ожидаемым значениям. Статистика критерия – отношение квадрата суммы линейной разности выборочных порядковых статистик к обычной оценке дисперсии.

Критерий Шапиро – Уилка основан на упорядоченных наблюдениях. Если серию из n независимых наблюдений, расположенную в порядке не убывания, обозначить символами x_1, x_2, \dots, x_n , то вычисляют промежуточную сумму S по формуле:

$$S = a_k [X_{(n+1-k)} - X_k], \quad (3.2)$$

где k – индекс, имеющий значения от 1 до $n/2$ или $(n - 1) / 2$ при четном и нечетном n соответственно; a_k – коэффициент, имеющий специальные значения для объема выборки n (значения a_k приведены в [28]).

Статистика критерия W имеет вид:

$$W = S^2 / (mn_2), \quad (3.3)$$

где $(mn_2) = \sum (x_i - \bar{x})^2$; n – объем выборки; m_2 – выборочный центральный момент второго порядка.

Если значения некоторых наблюдений равны, то упорядоченную серию значений нумеруют с повторением равных наблюдений столько раз, сколько они появляются в исходной серии [23].

При уровне значимости $\alpha = p$ критическая область образована значениями меньшими, чем квантиль p для $p = \alpha$.

Значения квантили статистики p критерия W для $p = \alpha = 0,01$ и $p = \alpha = 0,05$ приведены в [23].

Выводы по главе

Для подтверждения зависимости влияния очередности запуска электродвигателей на требуемую мощность ЭГУ разработаны программа и методика экспериментального и натурного исследований.

Разработан и выполнен экспериментальный стенд для исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показатели системы, а также разработана логическая схема автоматического управления для программирования логического контроллера ПЛК.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И НАТУРНОГО ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводили в рамках поставленных задач, предпосылок, гипотез, полученных на основе теоретических исследований влияния очередности запуска электродвигателей на требуемую мощность ЭГУ. Их осуществляли с целью подтвердить влияние процессов при пуске асинхронных электродвигателей, относящихся к одному узлу двигательной нагрузки, и очередности их запуска на устойчивость системы. Были получены результаты экспериментальных исследований для установившегося и пускового режимов работы электродвигателей объекта исследования.

Для экспериментальных исследований были выбраны асинхронные электродвигатели разной установленной мощности (см. таблицу 2.1). При их поочередном запуске были записаны значения тока и напряжения в процессе пуска и далее для установившегося режима.

Для представления изменения значений тока и напряжения при пуске асинхронных электродвигателей в порядке их поочередного запуска приведены временные диаграммы изменения этих величин для двух выбранных комбинаций.

По полученным результатам произведен расчет мощности ЭГУ, требуемой для запуска асинхронных электродвигателей, относящихся к одному узлу двигательной нагрузки

На рисунке 4.1 представлен фрагмент временной диаграммы изменения тока и напряжения при запуске электродвигателей комбинации № 1 (см. таблицу 3.2). Из диаграммы видно, что в момент запуска самого мощного электродвигателя максимальное значение тока достигает 91 А.



Рисунок 4.1 – Временная диаграмма изменений значений тока и напряжения в процессе запуска электродвигателей (комбинация № 1)

На рисунке 4.2 представлен фрагмент временной диаграммы изменения тока и напряжения для запуска электродвигателей комбинации № 6 (см. таблицу 3.2). На ней наглядно видно броски пускового тока в процессе запуска электродвигателей в технологической цепочке, что подтверждает значимость определения порядка запуска электродвигателей.

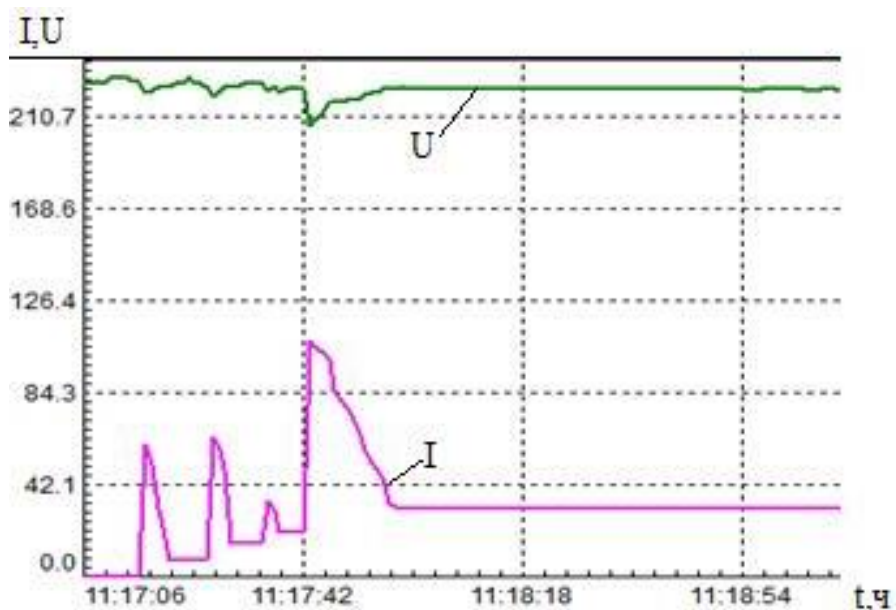


Рисунок 4.2 – Временная диаграмма изменений тока и напряжения запуска электродвигателей комбинации № 6

4.1.1 Статистическая обработка результатов эксперимента

Учитывая, что на формирование электрических нагрузок оказывает влияние большое количество разнообразных факторов, при обработке полученных результатов применяли вероятностный подход. Электрические параметры рассматривали как случайные величины.

При исследовании электрических нагрузок измеряли напряжение и ток. Для того, чтобы вероятностный подход можно было применить для решения практической задачи, необходимо знать числовые характеристики и закон распределения вероятностей функции S . Числовые характеристики функции случайной величины рассчитывались, зная числовые характеристики ее аргументов. Для определения закона распределения функции надо знать законы распределения аргументов.

В качестве случайных аргументов приняты значения напряжения U и тока I . Так как эти величины являются зависимыми, то можно записать что, математическое ожидание их произведения равно произведению математических ожиданий плюс ковариация:

$$M[S] = M[U]M[I] + K_{UI}; \quad (4.1)$$

$$K_{UI} = M[(U - m_U)(I - m_I)]; \quad (4.2)$$

$$m_U = M[U] ; m_I = M[I]. \quad (4.3)$$

Дисперсию определяют по формуле:

$$D[S] = D[U]D[I] + m_U^2 D[I] + m_I^2 D[U]. \quad (4.4)$$

Полная мощность:

$$S = cM[UI] + |c|\beta\sigma[UI], \quad (4.5)$$

где c – неслучайная величина, равная $\sqrt{3}$ при использовании линейных токов и напряжений, и равная 3 при использовании фазных токов и напряжений.

Фазное напряжение и фазный ток измеряли в процессе запуска и работы в установившемся режиме группы электродвигателей (см. таблицу 2.1) согласно сгенерированной комбинации порядка запуска. На основе математической статистики определяли достоверность полученных результатов, воспользовавшись критерием Шапиро – Уилка.

На рисунке 4.3 представлены гистограмма и кривая распределения броска пусковых токов.

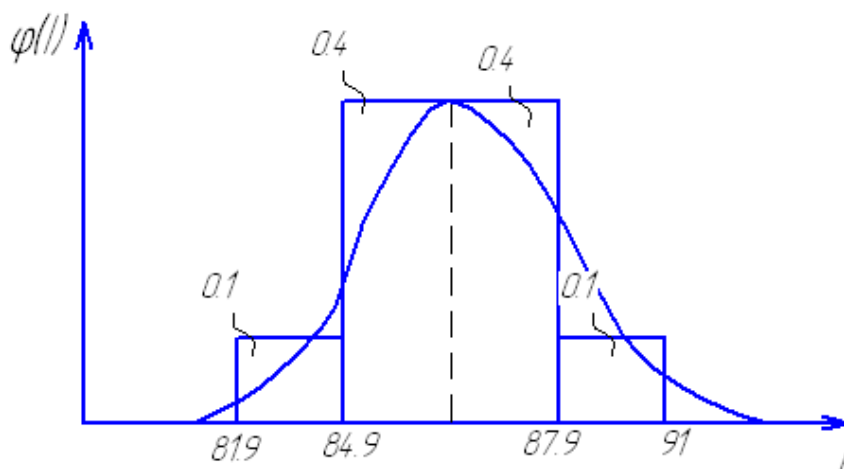


Рисунок 4.3 – Гистограмма распределения броска пускового тока $I_{\text{пуск}}$

Для анализа полученных данных в нашем случае можно применить выборку из интервала $8 \leq n \leq 50$.

Проверку подчинения величин пускового тока асинхронного электродвигателя нормальному закону распределения осуществляли на примере измеренных величин тока и напряжения одного из электродвигателей. Таблица 4.1 содержит упорядоченную серию $n = 10$ независимых значений пускового тока.

Таблица 4.1 – Пусковые токи, зафиксированные регистратором РПМ 16-4-3

k	x_k	$x(n+1-k)$	$x(n+1-k) - x_k$	ak
1	81,9	91,0	9,1	0,5739
2	82,6	87,2	4,6	0,3291
3	83,1	87,1	4,0	0,2141
4	83,2	86,7	3,5	0,1224
5	83,3	85,5	2,2	0,0399

Используя табличные значения, вычислили промежуточную сумму:

$$S = \sum a_k [(n+1-n) - X_n] = 8,1.$$

Статистика критерия $W = 0,897$.

В работе [23] даны значения p -квантиля. Для выборки $n = 10$ и $p = \alpha = 0,05$ значение p -квантиля 0,842. Поскольку оно меньше значения W , то нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется. Аналогичная проверка была проведена для остальных аргументов.

Значения статистик критерия и p -квантилей приведены в таблице 4.2. Поскольку во всех случаях значение p -квантиля меньше, чем значения статистик, делаем вывод о том, что все аргументы подчиняются нормальному закону.

Таблица 4.2 – Результаты проверки по критерию Шапиро – Уилка

Параметр	Пусковой режим		Установившийся режим	
	напряжение U , В	ток I , А	напряжение U , В	ток I , А
Статистический критерий W	0,872	0,897	0,904	0,937
p -квантиль	0,842			

4.1.2 Определение мощности двигательной нагрузки по результатам измерений

Результаты расчетной мощности ЭГУ по результатам измерений для каждой соответствующей комбинации матрицы представлены в приложении В (см таблицу 3.2). Нагрузку рассматривали как случайную величину. Определена максимальная величина нагрузки. Сравнивая результаты расчетной мощности, определенной по измеренным величинам, выбирали большее полученное значение. Расчетные мощности ЭГУ характерных (неповторяющихся) комбинаций сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчета полной мощности по измеренным величинам

Показатель	Номер комбинации					
	1	7	9	11	13	24
Расчетная мощность ЭГУ $S_{г.ном}$, кВ·А	27,0	27,0	29,4	29,4	27,4	31,8

Для оценки теоретически полученных мощностей ЭГУ, определенных по системе неравенств (2.23), и результатов расчетной мощности ЭГУ по измеренным величинам построен график экспериментальных и теоретических значений требуемой мощности ЭГУ (рисунок 4.4).

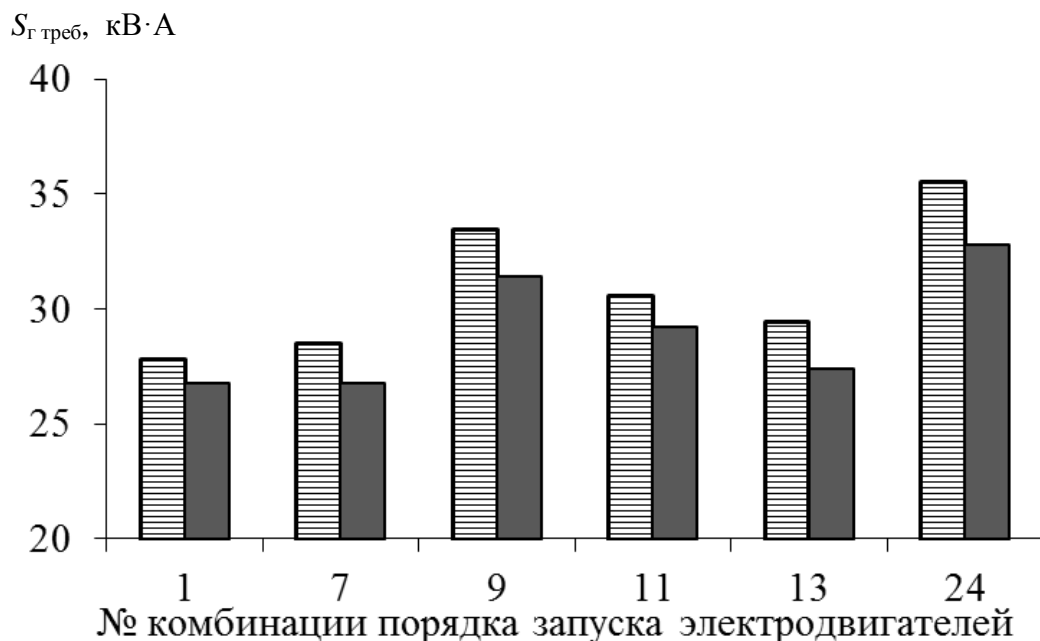




Рисунок 4.4 – Результаты экспериментального и теоретического расчета требуемой мощности ЭГУ  – теоретический расчет;  – экспериментальный

Таким образом, подтверждено теоретическое положение о влиянии мощности и очередности запуска электродвигателей на расчетную требуемую мощность ЭГУ для автономного электроснабжения электродвигательной сосредоточенной нагрузки. Сходимость теоретической и экспериментальной зависимостей имеет отклонение 6,5 %. Это соответствует инженерной точности расчета и свидетельствует о совпадении результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Для заданного узла электродвигательной нагрузки (см. таблицу 2.1) получены теоретические расчетные мощности ЭГУ при разном порядке запуска электродвигателей (см. таблицу 2.2) и расчетная мощность ЭГУ по результатам измерений (см. таблицу 4.3).

Согласно выражению (2.4), с учетом приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки требуемая номинальная мощность электрогенерирующей установки для установившегося режима работы для узла электродвигательной нагрузки должна составлять:

$$\begin{cases} S_{г.ном} \geq N_2 \text{ комбинации, кВ} \cdot \text{А}; \\ S_{г.ном} \geq 21,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \end{cases}$$

По результатам, полученным расчетным путем с помощью системы неравенств (2.23), для комбинации № 1 выбрана ЭГУ мощностью 30 кВ·А. Ее техническая характеристика представлена в приложении Б.

Основные методы расчета электрических нагрузок по установленной мощности электроприемников дают результат для установившегося режима работы электрооборудования. Для того, чтобы использовать расчетное значение для определения мощности генератора, необходимо полученную величину повысить в 2,0–2,5 раза по соотношению:

$$P_{г.ном} \geq 2,0 \dots 2,5 \sum P_{уст}. \quad (4.6)$$

Это необходимо для того, чтобы учесть влияние пусковых токов на работу ЭГУ. Соотношение (4.6) дает завышенный результат, но гарантирует восприятие любой нагрузки. В нашем случае мощность ЭГУ $S'_{г.ном} \geq 37 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Проведя анализ полученных величин, можно выделить для данной группы как минимум три мощностных ряда электрогенераторных установок в зависимости от порядка запуска электродвигателей – 25 кВ·А, 30 кВ·А и 40 кВ·А.

Для оценки работы выбранных генераторов рассчитаем коэффициент загрузки ЭГУ для установившегося режима работы и расход топлива. Зная время работы оборудования и потребляемую мощность, установленную по результатам измерений, определили коэффициент загрузки ЭГУ. Исходя из условий расчета требуемой мощности ЭГУ, найден коэффициент соизмеримости K^* . Результаты сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты определения коэффициента загрузки и расхода топлива

Параметр	Электрогенераторная установка	
	№ 1	№ 2
$S, \text{кВ}\cdot\text{А}$	30	40
$K_{з.г.}, \%$	72,3	55
K^*	1,14	1,5
$P_t, \text{л/ч}$	5,2	5,3
$b_{y.}, \text{л/кВ}\cdot\text{ч}$	0,295	0,305

Исходя из графика изменения расхода топлива в зависимости от загрузки генератора при 100-; 75-; и 50%-й нагрузках (рисунок 4.5), расходы топлива для генераторных установок при $K_{з.г.}$ составят 5,2 и 5,3 л/ч соответственно.

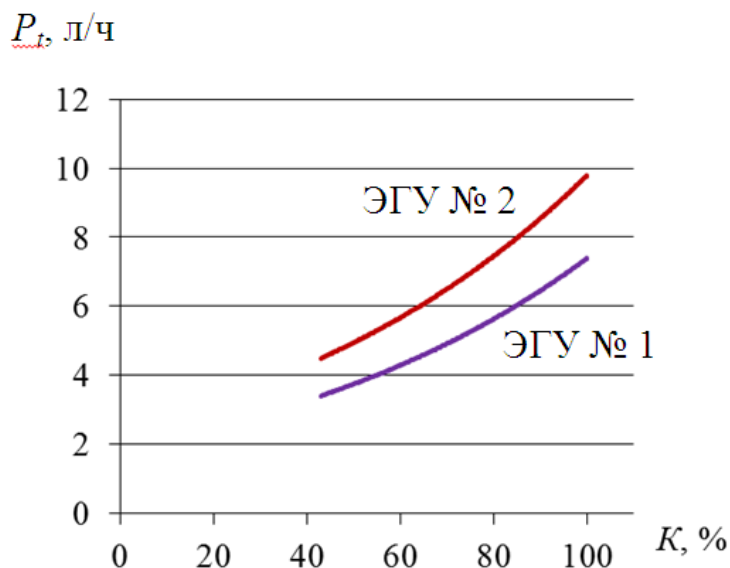


Рисунок 4.5 – Изменение расхода топлива в зависимости от загрузки генератора

Для оценки расхода топлива определены зависимости удельного расхода топлива, приведенные к выработанной электроэнергии (рисунок 4.6). Таким образом, для ЭГУ № 1 при $K_{з.г.} = 72,3\%$ удельный расход $b_y = 0,295$ л/кВ·ч, для ЭГУ № 2 при $K_{з.г.} = 55\%$ $b_y = 0,305$ л/кВ·ч.

Сравнение результатов расчета мощности электрических нагрузок показал, что предлагаемая методика позволяет более точно определить необходимую мощность электрогенераторной установки в автономной системе электроснабжения.

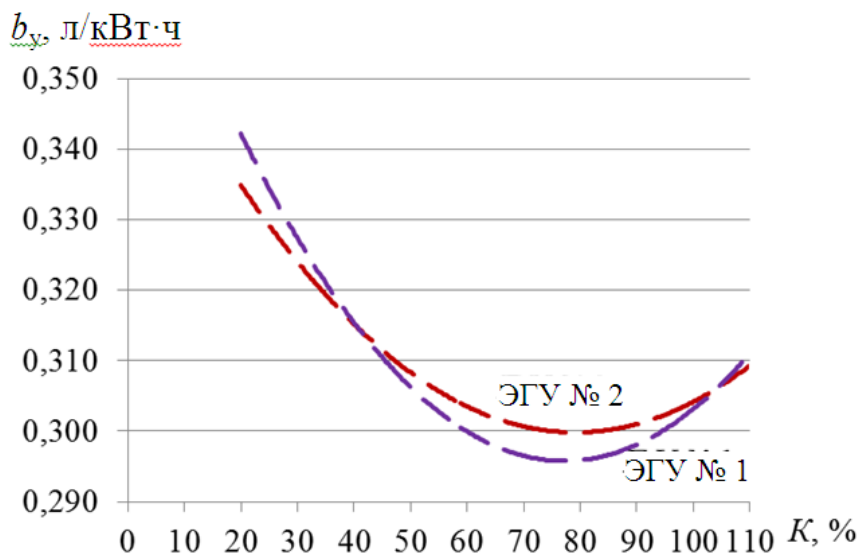


Рисунок 4.6 – Удельный расход топлива

Для узла электродвигательной нагрузки с заданным технологическим графиком расчетная мощность ЭГУ по предлагаемой методике составила 27,8 кВт·А. Выбрана ЭГУ номинальной мощностью 31 кВт·А. Принятая мощность электроприемников без учета порядка их включения составила 37 кВт·А. Выбрана электрогенерирующая установка номинальной мощностью 40 кВт·А.

Таким образом, в предлагаемой методике выбора ЭГУ для автономного электроснабжения технологических процессов учтены рекомендации по загрузке электростанций в длительном режиме работы и их перегрузочная способность. Даны способы уменьшения пиковой потребляемой мощности электродвигателя, влияющего на требуемую мощность ЭГУ при найденном коэффициенте соизмеримости, превышающем 1,6. Приведен пример уменьшения пусковых токов влияющего электродвигателя для комбинации № 24.

4.2 Результаты натурного исследования

4.2.1 Оценка электропитания ОВС-25 от электрогенераторов разной мощности

С целью апробации полученных результатов было проведено натурное исследование зерноочистительной машины ОВС-25 (очиститель вороха самоходный). Измерены значения тока и напряжения в процессе запуска и работы электродвигателей.

Исследование проводили для двух случаев. В первом случае источником питания являлась передвижная электростанция с ЭГУ мощностью 15 кВт·А и первичным двигателем мощностью 17,65 кВт (рисунок 4.7), во втором – бензогенератор EB7.0/400-S мощностью 13,5 кВт·А и первичным двигателем мощностью 12,7 кВт.

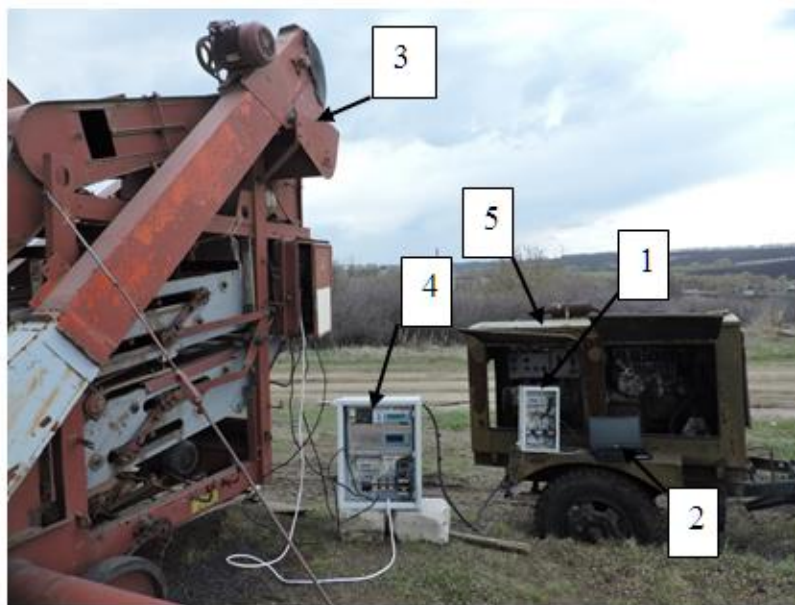


Рисунок 4.7 – Агрегат для исследования запуска электроприводов ОВС-25 от ЭГУ ЭД12-Т400: 1 – блок регистрации (регистратор РПМ-16-4-3); 2 – ноутбук; 3 – ОВС-25; 4 – блок управления (программируемый логический контроллер); 5 – ЭГУ ЭД12-Т400

Натурное исследование проводили следующим образом. Сначала проверяли готовность ЭГУ посредством контроля наличия топлива и уровня масла в системе смазки, а также надежность соединений между зерноочистительной машиной ОВС-25 и ЭГУ.

Запускали ЭГУ. После выхода на номинальный режим работы включали измерительный комплекс и производили настройку даты и времени. Далее проверяли каналы передачи сигнала в режиме измерения, после чего устанавливали режим записи. На дисплее регистратора появлялось сообщение «ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ». После начала процесса записи на дисплее отображалось текущее состояние регистратора с указанием общего размера записанных данных, времени записи и свободного места на диске.

Включали нагрузку (запускали асинхронные электродвигатели зерноочистительной машины ОВС-25) согласно технологии. Для заданного порядка запуска электродвигателей требуемая мощность ЭГУ по предлагаемой методике составила 14,4 кВт·А.

На рисунке 4.8 представлена диаграмма изменения значений тока и напряжения в процессе запуска электрооборудования зерноочистительной машины ОВС-25, запитанной от ЭГУ мощностью 15 кВт·А.

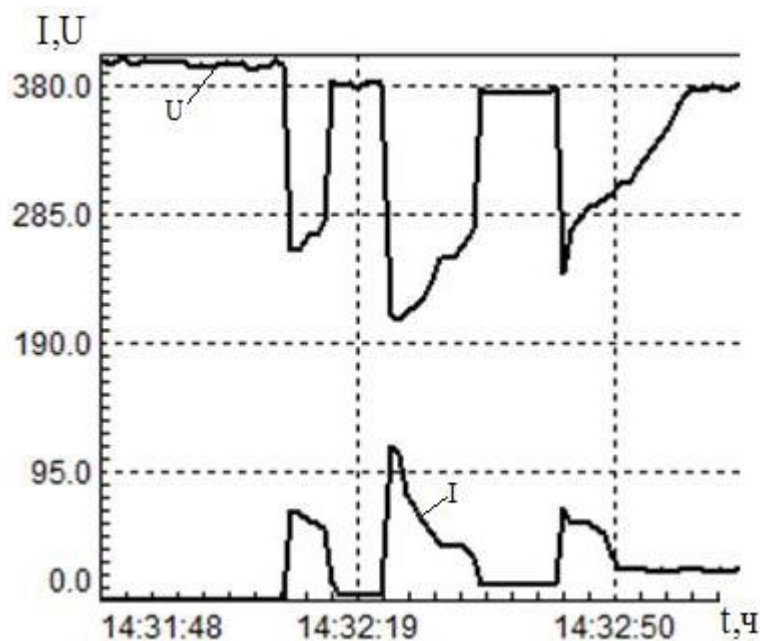


Рисунок 4.8 – Изменение значений тока и напряжения в процессе запуска электродвигателей ОВС-25 от ЭГУ мощностью 15 кВт·А

Полученные значения линейного напряжения и тока представлены в виде простого статистического ряда для наиболее загруженной фазы запускаемого электродвигателя привода машины (таблица 4.5). Полную мощность в пусковом и установившемся режимах определили как случайную и детерминированную величину.

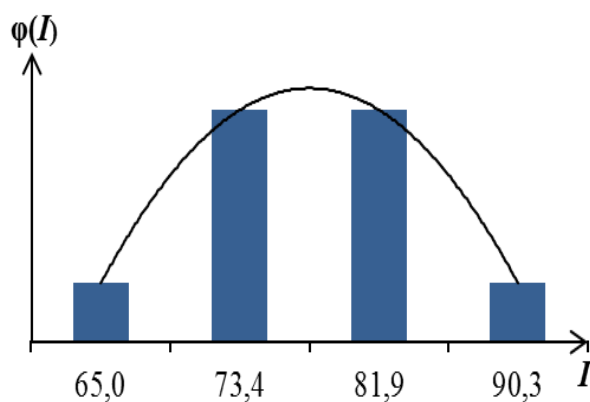
По данным таблицы 4.5 были рассчитаны числовые характеристики аргументов функции (таблица 4.6) и построена гистограмма (рисунок 4.9) распределения броска пускового тока $I_{\text{пуск}}$ для запускаемого электродвигателя.

Таблица 4.5 – Результаты натурального исследования

Номер замера	1	2	3	4	5	...	k	$k+1$	$k+2$...
<i>Пусковой режим</i>										
Напряжение U , В	386,0	384,0	383,0	382,0	381,0	...	379,0	376,0	375,0	...
Ток I , А	39,9	40,6	41,3	42,7	49,9	...	71,3	78,3	88,0	...
<i>Установившийся режим</i>										
Напряжение U , В	381,0	380,6	380,0	379,9	379,4	...	379,0	378,0	377,0	...
Ток I , А	19,9	20,98	17,25	16,56	20,82	...	20,14	18,68	19,91	...

Таблица 4.6 – Числовые характеристики аргументов функции

Параметр	Пусковой режим влияющего электродвигателя			Установившийся режим		
	напряжение U_{ϕ} , В	ток I_{ϕ} , А	мощность S_{ϕ} , кВт·А	напряжение U_{ϕ} , В	ток I_{ϕ} , А	мощность S_{ϕ} , кВт·А
Математическое ожидание M	372	64,7	32,8	379	19,9	10,8
Среднеквадратичное отклонение σ	71,9	23,9	11,9	0,95	2,06	1,3

Распределение броска пускового тока $I_{\text{пуск}}$

Карман	Частота
43,1	1
65,1	4
87,0	4
90,3	1

Рисунок 4.9 – Гистограмма распределения броска пускового тока $I_{\text{пуск}}$

По полученным значениям определена полная нагрузка исследуемого объекта в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} S_{\text{Г.НОМ}} \geq 13,1 \text{ кВт} \cdot \text{А}; \\ S_{\text{Г.НОМ}} \geq 10,8 \text{ кВт} \cdot \text{А}. \end{cases}$$

Анализ процесса запуска и измеренных величин электродвигателей зерноочистительной машины ОВС-25, запитанной от ЭГУ мощностью 15 кВт·А, пока-

зал, что процесс прямого пуска от генератора можно считать успешным. После выхода установки на номинальный режим работы загрузка составила 82 %.

Второе натурное исследование проводили с бензогенератором EB135/400 мощностью 13,5 кВ·А. Электрогенераторная установка выбрана по мощности, удовлетворяющей только одному из условий неравенства (2.23). Это было сделано с целью подтверждения влияния порядка запуска электродвигателей на работу системы источника и узла электродвигательной нагрузки.

Для того, чтобы не нарушать методику и условия проведения натурного исследования, были осуществлены те же самые действия и в той же последовательности, что и в первом случае.

Изменения значений тока и напряжения в процессе запуска электрооборудования зерноочистительной машины ОВС-25 показаны на рисунке 4.10. В результате запуска второго электродвигателя произошел провал напряжения до 109 В и в течение 9 с напряжение не восстанавливалось, поэтому запуск был прерван. На рисунке 4.10 видно, что в 16:32:32 произведен сброс нагрузки на генераторе.

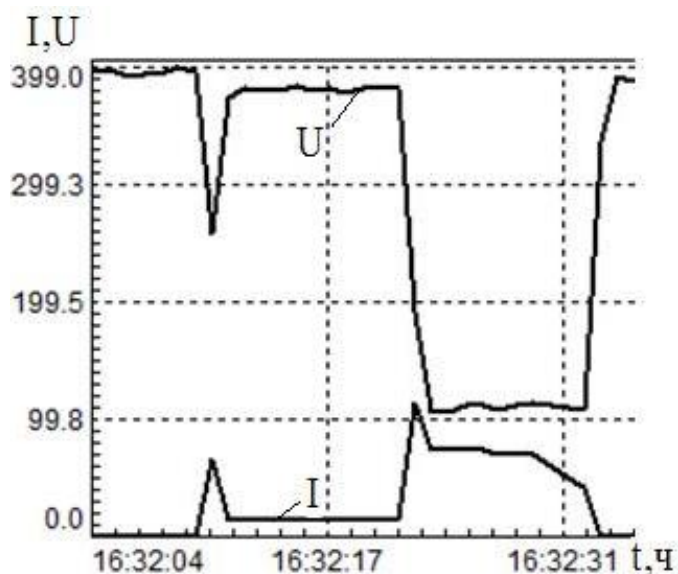


Рисунок 4.10 – Изменения значений тока и напряжения в процессе запуска электродвигателей ОВС-25 от ЭГУ мощностью 13,5 кВ·А

Для повторного запуска электродвигателей ОВС-25 был изменен порядок включения нагрузки (электродвигателей ОВС-25): первым запустили привод решетного стана и пневмотранспорта, вторым – привод выгрузного шнека, третьим – привод загрузчика.

Процесс запуска первого самого мощного электродвигателя длился 3–5 с, далее осуществляли запуск последующих электродвигателей (рисунок 4.11). Падение напряжения до 123 В с последующим восстановлением также свойственно при пуске самого мощного электродвигателя.

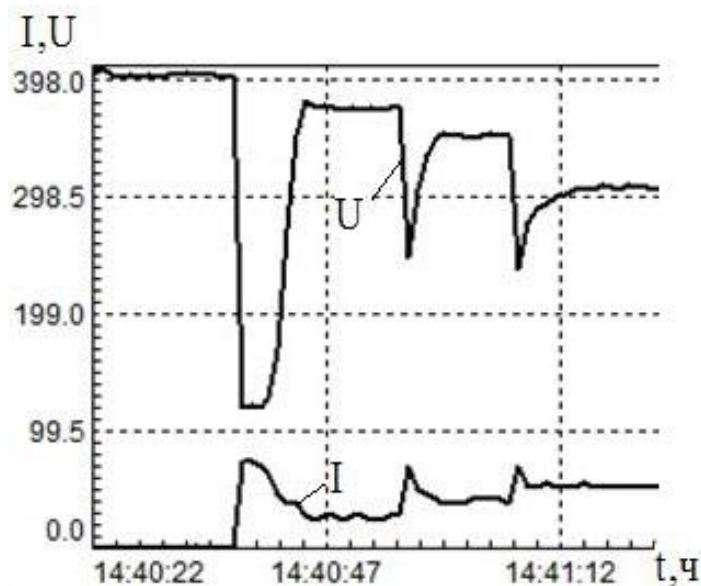


Рисунок 4.11 – Изменения значений тока и напряжения в процессе запуска электродвигателей ОВС-25 от ЭГУ 13,5 кВ·А (измененный порядок запуска)

Анализ графиков, представленных на рисунках 4.10 и 4.11, показывает, что генератор мощностью 13,5 кВ·А, подобранный по установленной мощности, позволяет произвести запуск всех электродвигателей при изменении последовательности пусков, но при дальнейшей работе в установившемся режиме он не выходит на номинальные параметры работы. Из этого следует, что выбор и дальнейшая эксплуатация данной установки не целесообразны.

Натурное исследование позволило подтвердить результаты теоретических и экспериментальных исследований на примере действующих сельско-

хозяйственных машин. Подтверждены также применимость и работоспособность предлагаемого подхода по определению мощности автономной ЭГУ для питания сельскохозяйственных машин, линий и аппаратов.

4.2.2 Анализ результатов расчета и выбора мощности ЭГУ для ОВС-25

На основании разработанной методики для зерноочистительной машины ОВС-25 получены теоретические расчетные мощности ЭГУ при заданном порядке запуска. По выражению (2.6) с учетом приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки требуемая номинальная мощность генерирующей установки $S_{г.ном} \geq 14,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

В итоге по предлагаемой методике результаты расчета требуемой мощности по системе неравенств (2.23):

$$\begin{cases} S_{г.ном} \geq 14,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}; \\ S_{г.ном} \geq 12,8 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \end{cases}$$

Основные методы расчета электрических нагрузок по установленной мощности электроприемников дают результат для установившегося режима работы электрооборудования. Для того, чтобы использовать расчетное значение для определения мощности генератора, необходимо полученную величину завысить в 2,0–2,5 раза по соотношению (1.21). Это необходимо для того, чтобы учесть влияние пусковых токов на работу ЭГУ. Соотношение (1.21) дает завышенный результат, но гарантирует восприятие любой нагрузки.

В рассмотренном случае при таком подходе минимальная мощность ЭГУ для ОВС-25 $S'_{г.ном} \geq 22 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Это свидетельствует о том, что в процессе эксплуатации генераторная установка будет работать на 50 %, что снижает ее уровень полезности и увеличивает срок окупаемости инвестиционных средств.

Выводы по главе

Установлено, что предлагаемая методика позволяет учесть порядок запуска электродвигателей привода машины и без ущерба для технологического процесса очистки зерна уменьшить запас по мощности выбираемой ЭГУ на одну ступень— с 25 до 15 кВт·А, т. е. в 1,67 раза. При этом показатели энергоэффективности в целом улучшаются: расход топлива снижается на 26 %, КПД ЭГУ повышается за счет увеличения загрузки с 47 до 78 %, удельная мощность (кВт·А/кг) ЭГУ не изменяется.

Результаты экспериментальных исследований разработанной методики выбора требуемой мощности ЭГУ подтвердили аналитические зависимости влияния величины и характера электрических нагрузок в системе электропитания на требуемую мощность ЭГУ. Отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований составляет 6,9 %.

Применение предлагаемого алгоритма расчета и выбора мощности ЭГУ позволяет уменьшить ее мощность с помощью предложенных условий и ограничений пусковых изменений нагрузки с последующим увеличением загрузки ЭГУ в установившемся режиме работы с 65 до 80 %.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВЫБОРУ МОЩНОСТИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В условиях рыночной экономики наряду с экономической эффективностью следует учитывать и коммерческую эффективность, т. е. соотношение финансовых затрат и результатов [53, 54, 97].

Эффективность применения разработанной методики выбора требуемой мощности генератора достигается за счет сокращения удельных капиталовложений в автономный источник питания и снижения эксплуатационных затрат за счет существенной экономии топлива.

Одним из показателей, определяющим эффективность применения предлагаемого порядка расчета и выбора мощности ЭГУ, является чистый дисконтированный доход. ЧДД определяю как сумму текущих эффектов за расчетный период эксплуатации, приведенную к начальному шагу (году или месяцу), или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами [53, 94, 97].

Для оценки технико-экономических показателей предлагаемого подхода к выбору источника произведено сравнение выбора мощности автономного источника питания по предлагаемой методике на примере двух электрогенераторных установок для электроснабжения одной и той же сельскохозяйственной технологической машины ОВС-25. Характеристики электрогенераторных установок (см. таблицу 2.2) представлены в приложении Б.

5.1 Результаты расчета капитальных вложений

При выборе автономного электроснабжения от дизельной электростанции капитальные затраты K включают в себя стоимость агрегата, доставки и пуско-наладочных работ:

$$K = C_{\text{дг}} + C_{\text{тр}} + C_{\text{мон}}, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{дг}}$ – стоимость агрегата, руб.; $C_{\text{тр}}$ – затраты на транспортирование, руб.; $C_{\text{мон}}$ – стоимость монтажа и пуско-наладочных работ, руб.

Исходя из анализа результатов расчета мощности ЭГУ для ОВС-25 по существующей методике $S'_{\Gamma_{\text{ном}}} \geq 22 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, принят дизельный генератор SDMO K28H номинальной мощностью 25 кВ·А. С учетом монтажа и пуско-наладочных работ капитальные вложения $K_{\text{В1}} = 914957$ руб.

По предлагаемой методике требуемая мощность составила 14,4 кВ·А, принят дизельный генератор SDMO K16 номинальной мощностью 15 кВ·А. С учетом монтажа и пуско-наладочных работ $K_{\text{В2}} = 709412$ руб.

5.2 Расчет эксплуатационных издержек

Эксплуатационные издержки I_t представляют собой расходы на техническое обслуживание электрогенераторной установки, текущий ремонт (1-3% от стоимости ЭГУ) и затраты на топливо и масло:

$$I_t = 0,02K + P_t T C_t + G_{\text{см}} C_{\text{см}} T, \quad (5.2)$$

где P_t – расход топлива, л/ч; C_t – стоимость топлива, руб./л; T – время работы за год, ч; $G_{\text{см}}$ – удельный расход масла, л/ч; $C_{\text{см}}$ – стоимость масла, руб./л.

Расход топлива у выбранных агрегатов будет отличаться, несмотря на то, что они работают на одну и ту же нагрузку. Для этого определим коэффициент загрузки выбранных электрогенераторных установок для установленного режима работы и расход топлива (таблица 5.1).

Для оценки расхода топлива определены зависимости удельного расхода топлива, приведенные к выработанной электроэнергии (рисунок 5.1). Таким образом, для ЭГУ № 1 при $K_{3,\Gamma} = 47 \%$ удельный расход составил $b_y = 0,541$ л/кВ·ч, для ЭГУ № 2 при $K_{3,\Gamma} = 78 \%$ $b_y = 0,401$ л/кВ·ч.

Таблица 5.1 – Результаты определения коэффициент загрузки и расхода топлива

Параметр	ЭГУ № 1	ЭГУ № 2
$S, \text{кВ}\cdot\text{А}$	25	15
$K_{з.г.}, \%$	47	78
K^*	1,7	1,05
$P_t, \text{л/ч}$	4,9	3,9
$b_{y.}, \text{л/кВт}\cdot\text{ч}$	0,54	0,4

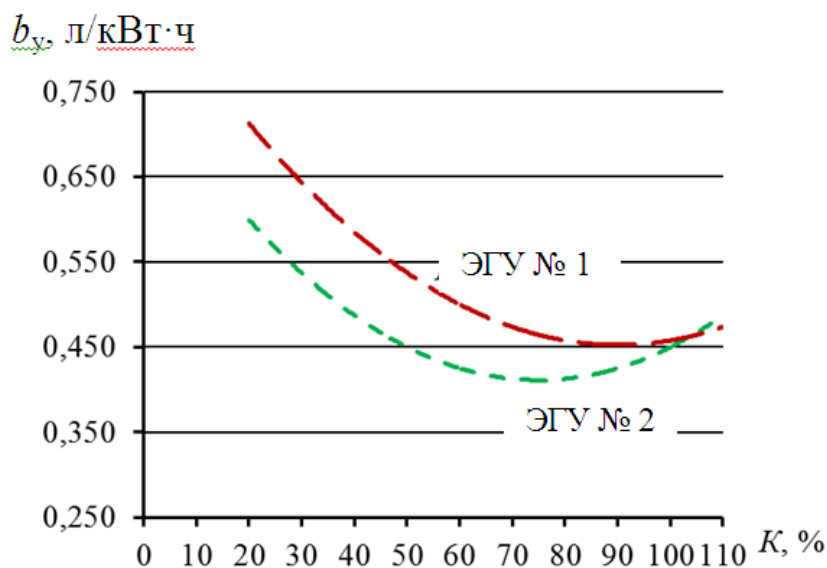


Рисунок 5.1 – Удельный расход топлива

Таким образом, годовые эксплуатационные издержки по существующей методике при времени работы ЭГУ от 800 до 1200 часов в год составят: для ЭГУ № 1 – $I_{B1} = 325640$ руб.; по предлагаемому алгоритму расчета ЭГУ № 2 – $I_{B2} = 252070$ руб.

5.3 Оценка экономической эффективности капитальных затрат

Показатели капиталовложений и эксплуатационных издержек при существующей методике расчета (вариант 1) и предлагаемой (вариант 2) представлены в таблице 5.2.

Капиталовложения при использовании предлагаемой методики оказались меньше на 295545 руб. ($\Delta K_{B2-B1} = 205545$ руб.). Экономия эксплуатационных затрат $\mathcal{E}_{B1-B2} = 73571$ руб.

Таблица 5.2 – **Основные экономические показатели автономного электроснабжения сельскохозяйственной технологической машины ОВС-25**

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Капитальные вложения, руб.	914957	709412
Эксплуатационные издержки, руб.	325540	252000
Сумма затрат в начале первого года, руб.	1240000	961000

Рассчитаем чистый дисконтированный доход за 10 лет эксплуатации ЭГУ по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{n=1}^{10} \frac{\text{Э}_i}{(1+E)^n} - \Delta K_i, \quad (5.3)$$

где E – ставка дисконтирования, E = 15 %.

Результаты расчета чистого дисконтированного дохода от применения предлагаемого подхода по определению требуемой мощности ЭГУ получились больше нуля, что является основанием для подтверждения целесообразности его применения.

В таблице 5.3 представлены технико-экономические показатели рассмотренных вариантов электропитания сельскохозяйственной машины ОВС-25 с характерной двигательной нагрузкой от двух разных по мощности источников питания.

Таблица 5.3 – **Основные технико-экономические показатели предлагаемого подхода к выбору источника автономного электроснабжения на примере сельскохозяйственной машины ОВС-25**

Показатель	По существующей методике	По предлагаемой методике
Капитальные вложения, тыс. руб.	915	710
Эксплуатационные издержки, тыс. руб.	325,5	252
Сумма затрат на начало первого года, тыс. руб.	1240	961
ЧДД, тыс. руб.		340
Индекс доходности		0,5
Годовой экономический эффект, тыс. руб.		73,5

Таким образом, предлагаемый подход к определению требуемой мощности для автономного электропитания электродвигательной нагрузки позволяет

достичь снижения прямых затрат на 10–15 %, приведенных – на 10–20 % при выборе установки одного производителя. Если рассматривать более широкий диапазон производителей генераторных установок, то эффект может увеличиться до 30 %.

Выводы по главе

Экономическая эффективность применения подхода по определению и выбору требуемой мощности ЭГУ для питания электродвигательной нагрузки выражается в снижении удельного расхода топлива на 15–20 %, сокращении удельных капиталовложений за счет обеспечения выбора меньшей, но необходимой мощности ЭГУ и увеличения при этом загрузки ЭГУ на 20–30 %.

Для исследуемой сельскохозяйственной технологической машины ОВС-25 при использовании предлагаемой методики выбора мощности генератора первоначальные капиталовложения в источник питания сократятся на 205,0 тыс. руб., а экономический эффект составит 73,5 тыс. руб. в год за счет существенной экономии топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена актуальная научно-практическая задача повышения энергоэффективности работы электрогенераторной установки для электроснабжения технологических процессов сельхозпредприятий за счет обоснования мощности и рекомендованной загрузки, снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

1. На основании анализа использования ЭГУ для автономного питания технологических процессов при сосредоточенной электродвигательной нагрузке различного сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) определено, что недостатками их применения являются завышение мощности ЭГУ и отсутствие подхода, учитывающего влияние очередности запуска электродвигателей в технологическом процессе при выборе источника, имеющего мощность, соизмеримую с отдельными единицами узла двигательной нагрузки.

2. Определена область допустимого сочетания мощностей запускаемых электродвигателей и нагрузки на генераторе, при которых ЭГУ обеспечит их успешный запуск. Мощность очередного запускаемого электродвигателя в этой группе должна составлять не более 45 % от остаточной мощности нагружаемого генератора – $0,45(P_{г.ном} - P_{нагр})$.

3. Разработан порядок расчета и выбора мощности ЭГУ для электроснабжения технологических процессов в сельском хозяйстве, позволяющий учитывать последовательность запуска электродвигателей в технологической цепочке и обеспечивать выбор необходимой мощности ЭГУ. Предложено для оценки загрузки ЭГУ и влияния на нее порядка запуска электродвигателей использовать коэффициент соизмеримости источника питания и нагрузки. Рекомендуемой областью значений данного коэффициента является диапазон от 1,0 до 1,6. Увеличение $K^* > 1,6$ применительно к узлу нагрузки сви-

детельствует о том, что загрузка ЭГУ в длительном режиме работы составляет менее 50 %, что ухудшает энергоэффективность ЭГУ.

4. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические оценки влияния порядка запуска асинхронных электродвигателей в технологическом процессе на требуемую мощность автономного источника питания – ЭГУ. Установлено, что управление порядком запуска электродвигателей позволяет уменьшить мощность выбираемой установки в 1,5 раза, или на одну ступень, и улучшить показатели энергоэффективности ЭГУ: снизить расход топлива на 15–20 %, увеличить загрузку генератора ЭГУ на 20–30 %. Отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований составляет 6,9 %.

5. Экономическая эффективность разработанного порядка расчета и выбора требуемой мощности ЭГУ достигается за счет выбора меньшей, на одну ступень, мощности ЭГУ, увеличения при этом загрузки ЭГУ и выражается в снижении удельного расхода топлива, сокращении удельных капиталовложений и эксплуатационных затрат. Для исследуемой сельскохозяйственной технологической машины ОВС-25 применение предлагаемого разработанного порядка расчета и выбора мощности ЭГУ позволило обосновать уменьшение мощности выбираемой ЭГУ с 25 до 15 кВт·А и повысить загрузку ЭГУ с 47 до 78 %. Первоначальные капиталовложения в источник питания сократились на 205,0 тыс. руб., а экономический эффект составил 73,5 тыс. руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автономного электроснабжения сельскохозяйственных предприятий с организацией производства по поточному принципу. Разработанный порядок расчета и выбора мощности автономного источника питания можно применять при приобретении ЭГУ для электроснабжения технологических процес-

сов, операции которых выполняют с помощью различного сельскохозяйственного оборудования (средств механизации в сельском хозяйстве) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Разработка базы данных оборудования сельскохозяйственного назначения (средств механизации в сельском хозяйстве) в части сосредоточенной электродвигательной нагрузки. Разработка программного обеспечения для контроллеров, обеспечивающих алгоритмы действия электродвигателей привода в технологической цепочке и для выбора необходимой мощности ЭГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономная система электроснабжения пасечного хозяйства / Г. В. Никитенко [и др.] // Young Science. – 2014. – № 3. – С. 56–60.
2. *Бастрон, А. В.* Моделирование режимов работы автономной микрогэс для электроснабжения летней дойки / А. В. Бастрон, Н. В. Коровайкин, Л. П. Костюченко // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2010. – № 4. – С. 166–172.
3. Бензиновые электрогенераторы EB12.0/400-15.0/400 : техническое описание и руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / МНПО «Энергоспецтехника». Режим доступа : https://spectech.ru/catalog/benzinovy_elektrostantsii/energo-eb-15-0-400-yle/ – 20 с.
4. *Берковский, Б. М.* Возобновляемые источники энергии на службе человека. Сер. Наука и технический прогресс / Б. М. Берковский, В. А. Кузьминов. – М. : Наука, 1987. – 128 с.
5. *Богачев, В. С.* Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Богачев Василий Сергеевич. – СПб., 2011. – 16 с.
6. *Будзко, И. А.* Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М. : Агропромиздат, 1990. – 496 с.
7. *Варивода, М. С.* Электрооборудование мелиоративных насосных устано-вок / 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.
8. *Васильев, Д. А.* Оценка энергетической эффективности асинхронного двигателя по м-образной схеме замещения / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, В. А. Носков // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 1. – С. 34–40.

9. Васильев, Д. А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, П.Н. Покоев, В.А. Носков // Вестник НГИЭИ. 2019. № 4 (95). С. 100–115.

10. Вахрушев А. А. Программирование и настройка адаптивной управляющей системы / А. А. Вахрушев, Каргин В. А. // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. XI Национальной науч.-практ. конф. с международным участием. – Саратов : ООО «ЦеСАин», 2020. – С. 34–37.

11. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учебник для электроэнергетич. спец. вузов / В. А. Веников. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.

12. Верзилин, А. А. Автономное энергоснабжение с использованием топлива местных возобновляемых ресурсов / А. А. Верзилин, И. Н. Попов // Инновационные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : матер. V Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2017. – С. 187–189.

13. Верзилин, А. А. Автономное энергоснабжение / А. А. Верзилин, М. В. Зайцева // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В. А. Трушкина. – Саратов, 2016. – С. 24–27.

14. Верзилин, А. А. Вероятностный метод расчета полной электрической мощности потребителей в энергетической системе предприятий / А. А. Верзилин, В. А. Глухарев, И. Н. Попов // Научное обозрение. – 2016. – № 23. – С. 116–120.

15. Верзилин, А. А. Выбор мощности дизельгенератора на основе плотности мощностного ряда / А. А. Верзилин, И. Н. Попов, Д. В. Сивицкий // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ф. К. Абдразакова. – Саратов, 2016. – С. 252–256.

16. Верзилин, А. А. Граничные условия использования автономного источника электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / А. А. Верзилин, С. Ю. Рыхлов // Специалисты АПК нового поколения : матер. Всерос. науч.-практ. конф. – Саратов : Буква, 2014. – С. 91–94.

17. *Верзилин, А. А.* Обоснование мощности генератора источника электроснабжения в автономной энергетической системе / А. А. Верзилин, В. А. Глухарев, И. Н. Попов // Научное обозрение. – 2017. – № 15. – С. 68–71.

18. *Верзилин, А. А.* Оптимизация выбора источника электроснабжения индивидуальных сельских потребителей / А. А. Верзилин, С. Ю. Рыхлов // Вестник студенческого научного сообщества : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2014. – Ч. III. – С. 76–77.

19. Ветродизельная установка для электроснабжения фермерского хозяйства / С. Ф. Степанов [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2016. – Т. 1. – № 33. – С. 41–48.

20. *Вийтович, И. О.* Новые источники электроэнергии / И. О. Вийтович, В. Г. Телешов // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. – 2010. – № 2. – С. 19–24.

21. *Воронин, С. М.* Метод получения графиков потребления электроэнергии фермерскими хозяйствами / С. М. Воронин // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 6. – С. 23–24.

22. *Воронин, С. М.* Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на основе возобновляемых источников энергии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Воронин Сергей Михайлович. – зерноград, 2009. – 33 с.

23. *Воронин, С. М.* Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на основе возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Воронин Сергей Михайлович. – зерноград, 2009. – 279 с.

24. *Воронин, С. М.* Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на возобновляемых источниках энергии : [монография] / С. М. Воронин. – зерноград, 2010. – 304 с.

25. *Воронцов, А. В.* Оценка перспектив развития распределенной генерации России в рамках развития энергетики России / А. В. Воронцов // Вестник ГУУ. – 2014. – № 14. – С. 115–120.

26. Выбор мощности резервной электростанции сельскохозяйственного предприятия / И. А. Будзко [и др.] // Электричество. – 1980. – № 3. – С. 1–5.

27. ГОСТ 33073–2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 81 с.

28. ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения вероятностей от нормального распределения. – М. : Госстандарт, 2002. – 25 с.

29. ГОСТ Р 53987–10. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Ч. 1. Применение, технические характеристики и параметры. Введ. 06.01.2012. – М. : Стандартинформ, 2012. – 16 с.

30. Графики электрических нагрузок [Электронный ресурс]. – режим доступа : http://www.eti.su/articles/electrotehnika/electrotehnika_685.html

31. *Губин, В. И.* Статистические методы обработки экспериментальных данных / В. И. Губин, В. Н. Осташков. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2007. – 202 с.

32. Дизельные электростанции – ДЭС, дизель-генераторы «Азимут» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gc-azimut.ru/index/> (дата обращения 12.03.2014 г).

33. *Дмитриенко, В. Н.* Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса / В. Н. Дмитриенко, Б. В. Лукутин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 4. – С. 61–66.

34. *Дьяченко, Ю. А.* Выбор средств обеспечения надёжности электроснабжения птицефабрики по многокритериальной модели : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Дьяченко Юрий Александрович. – М., 2008. – 17 с.

35. *Ерошенко, Г. П.* Решение инженерных задач в условиях неопределенности : учебное пособие / Г. П. Ерошенко, Ю. И. Березнев. – Саратов, 2004. – 160 с.

36. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко, М. А. Таранов, Ю. А. Медведко. – Ростов н/Д : Терра, 2001. – 590 с.

37. *Журавлева, Л. А.* Совершенствование технологических приемов полива дождевальными машинами кругового действия «Каскад» / Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев // Мелиорация. – 2019. – № 1 (87). – С. 78–82.

38. *Завалишин, В. В.* Дизель-генераторная установка автономного электроснабжения с микропроцессорной системой управления / В. В. Завалишин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 3 (47). – С. 38–41.

39. *Завалишин, В. В.* Улучшение эксплуатационных характеристик дизельной электростанции при работе на изменяющуюся нагрузку : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Завалишин Вячеслав Владимирович. – Саратов, 2010. – 19 с.

40. *Закиров, И. В.* Автономная ветроэлектростанция с комбинированным аккумулированием энергии для сельскохозяйственных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Закиров Илья Валерьевич. – Зерноград, 2016. – 132 с.

41. *Иващенко, В. С.* Автономные источники электроэнергии. Нормативные требования. Практика проектирования, монтажа и эксплуатации / В. С. Иващенко, Г. М. Мартьянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2006. – № 6. – С. 3–5.

42. *Кабышев, А. В.* Электроснабжение объектов. Ч. 1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования : учебное пособие / А. В. Кабышев. – Томск, 2007. – 185 с.

43. *Капитонов, О. К.* Влияние кратности возбуждения синхронных генераторов на работу узла нагрузки соизмеримой мощности / О. К. Капитонов, В. А. Щедрин // Вестник ЧГУ. – 2012. – № 3. – С. 121–126.

44. *Карякин, А. Л.* Выбор параметров электротехнического комплекса дизельной электростанции для систем питания потребителей первой категории особой группы / А. Л. Карякин, Д. А. Булыгин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 228.

45. Классификация электростанций (ДЭС), выбор типа генератора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energodom.ru/?module=articles&id=502> (дата обращения 02.12.2016).

46. *Кольниченко, Г. И.* Экспериментальное исследование характеристик дизель-генератора, работающего на дизельном топливе с биодобавками / Г. И. Кольниченко, А. В. Сиротов, Я. В. Тарлаков // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 3 (86). – С. 58–61.

47. *Кононов, Ю. Д.* Долгосрочное прогнозирование динамики цен на российских энергетических рынках / Ю. Д. Кононов // Проблемы прогнозирования. – 2005. – № 6. – С. 53–60.

48. *Коноплёв, П. В.* Автономная система электроснабжения для пасечного хозяйства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Коноплёв Павел Викторович. – зерноград, 2013. – 19 с.

49. *Коноплёв, Е. В.* Применение ветроэнергетической установки в системе автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей малой мощности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Коноплёв Евгений Викторович. – зерноград, 2007. – 19 с.

50. Концепции развития электроэнергетической и теплоснабжающей инфраструктуры в Российской Федерации на основе когенерации и распределенной энергетики. – М. : Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике, 2012. – 20 с.

51. *Коровин, Н. В.* Электрохимическая энергетика / Н. В. Коровин. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 263 с.

52. *Коршунов, А. П.* О роли возобновляемых источников энергии в энергообеспечении сельского хозяйства / А. П. Коршунов // Энергетическое строительство. – 1995. – № 5. – С. 38–42.

53. *Коршунова, Л. А.* Экономика энергетических предприятий : учебное пособие / Л. А. Коршунова, Н. Г. Кузьмина. – Томск, 2006.

54. *Купреев, Д. А.* Управление инновационным развитием распределенной энергетики в России / Д. А. Купреев // УЭКС. – 2015. – № 10 (82). – С. 15.

55. *Лисовин, И. Г.* Повышение качества управления газотурбинной энергетической установкой на базе авиадвигателя при работе в локальной сети : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Лисовин Игорь Георгиевич. – Пермь, 2011. – 16 с.

56. *Магадеев, Э. В.* Методика выбора оптимального варианта повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 5.20.02 / Магадеев Эльдар Владимирович. – М., 2008. – 18 с.

57. *Макаревич, Е. В.* Разработка методики выбора газопоршневых установок для энергоснабжения потребителей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Макаревич Елена Владимировна. – М., 2012. – 20 с.

58. *Малозёмов, А. А.* Повышение эффективности многофункциональных энерготехнологических комплексов совершенствованием двигатель-генераторных установок : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / Малозёмов Андрей Адиевич. – Челябинск, 2011. – 34 с.

59. *Мамонов, А. М.* Разработка технических, экономических и экологических критериев применения систем генерирования электрической энергии малой мощности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Мамонов Андрей Михайлович. – Н. Новгород, 2006. – 18 с.

60. *Медведько, А. Ю.* Повышение надёжности электроснабжения удалённых сельскохозяйственных объектов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Медведько Алексей Юрьевич. – зерноград, 2011. – 19 с.

61. *Мелешкин, Г. А.* Устойчивость энергосистем : [монография] / Г. А. Мелешкин, Г. В. Меркурьев. – СПб., 2006. – Кн. 1. – 369 с.

62. Методика определения потребности в средствах электроснабжения для социального развития села [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.opengost.ru/iso/65_gosty_iso/65040_gost_iso/6504099_gost_iso/13376-metodika-opredeleniya-potrebnosti-v-sredstvah-elektrosnabzheniya-dlya-socialnogo-razvitiya-sela.html (дата обращения 20.02.2016).

63. *Михайлов, А.* Малая энергетика России. Классификация, задачи, применение / А. Михайлов, А. Агафонов, В. Сайданов // Новости электротехники. – 2005. – № 5. – С. 21–27.

64. *Михайлов, А. К.* Автономное или централизованное электроснабжение? Границы экономической эффективности / А. Михайлов, Г. Сухарь // Новости электротехники. – 2006. – № 2.

65. *Николаев, В. В.* Обоснование параметров ветродизельных энергокомплексов с учетом местного ветропотенциала и графиков нагрузки : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.08 / Николаев Василий Владимирович. – М., 2016. – 147 с.

66. Обзор рынка малой энергетике РФ : дизельные электростанции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dizel-market.ru/info/rynok-dizelnyh-elektrostanciy.php> (дата обращения 02.12.2016).

67. *Обухов, С. Г.* Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Обухов Сергей Геннадьевич. – Томск, 2013. – 41 с.

68. Определение мощности генератора источника электроснабжения в локальной энергетической системе / А. А. Верзилин [и др.] // Энергетик. – 2019. – №. 2. – С. 16–18.

69. *Петров, И. В.* Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / под ред. В. П. Дьяконова. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.

70. *Попов, И. Н.* Обоснование мощности генерирующей установки автономного источника по структуре электрической нагрузки потребителя / И. Н. Попов, С. Ю. Рыхлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 3 (76). – С. 80–82.

71. *Попова, С. Н.* Перспективы и ограничения развития распределенной энергетики на электроэнергетическом рынке России / С. Н. Попова, Н. В. Потехина // Общество : политика, экономика, право. – 2016. – № 12. – С. 93–95.

72. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. N 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/70388616/>

73. Правила устройства электроустановок : Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. – Новосибирск, 2009. – 853 с.

74. Применение дизельных электростанций в качестве резервного источника электропитания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://electricalschool.info/main/elsnabg/588_primjenjenije_ljektrosta_ncij.html (дата обращения 11.10.2016).

75. Промышленные дизельные электростанции [Электронный ресурс] // Enprommash. – Режим доступа : <http://www.enprommash.ru/production/diesel>

76. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р «Об энергетической стратегии России на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-13112009-n-1715-r/>

77. Распоряжение Правительства РФ от 2 февраля 2015 г. № 151-р «Об утверждении Стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.garant.ru/acts/151-15-15/>

ской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://government.ru/docs/16757/>

78. Распоряжение Правительства РФ от 4 октября 2012 г. № 1839-р «Об утверждении комплекса мер стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе возобновляемых источниках энергии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/70237140/>

79. РД 34.20.178 (СО 153-34.20.178). Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Сельэнергопроект, 1980. – 117 с.

80. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSyS 2.3. – редакция RU 2.4, для CoDeSyS v2.3.6.x.

81. *Рыхлов, С. Ю.* Определение параметров дизель-генератора мини-ТЭС в автономных системах по условиям устойчивости / С. Ю. Рыхлов, В. А. Глухарев, И. Н. Попов // Научное обозрение. – 2015. – № 24. – С. 163–166.

82. *Савина, Н. В.* Применение теории вероятностей и методов оптимизации в системах электроснабжения : учебное пособие / Н. В. Савина. – Благовещенск, 2007. – 272 с.

83. *Степанов, С. Ф.* Особенности построения автономной ветродизельной системы электроснабжения объектов с электроприемниками разного типа / С. Ф. Степанов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 121.

84. *Стребков, Д. С.* Перспективные направления развития и модернизации систем энергообеспечения сельского хозяйства / Д. С. Стребков, А. В. Тихомиров // Вестник ГНУ ВИЭСХ. – 2009. – № 1 (4). – С. 5–17.

85. *Стребков, Д. С.* Перспективные направления развития энергетической базы села и повышения энергоэффективности сельхоз производства / Д. С. Стребков, А. В. Тихомиров // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 10. – С. 4–9.

86. *Суржиков, А. В.* Методы повышения надежности электроснабжения и устойчивости работы предприятий с непрерывными технологическими процессами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Суржиков Александр Викторович. – М., 2012. – 26 с.

87. *Сыромятников, И. А.* Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. – М., 1984. – 240 с.

88. *Телешова, Н. С.* Электроэнергетическая установка на базе синхронной магнитоэлектрической машины и газотурбинного двигателя с газовыми подшипниками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Телешова Наталья Сергеевна. – Комсомольск-на-Амуре, 2012. – 22 с.

89. *Терехов, Д. В.* Повышение эффективности тепловых двигателей с использованием теплонасосных установок при неравномерном графике энергопотребления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Терехов Дмитрий Владимирович. – М., 2012. – 19 с.

90. Устройство ветроэнергетической установки для электроснабжения овцеводческих хозяйств небольшой мощности / Е. В. Коноплев [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. – 2016. – № 3 (23). – С. 41–46.

91. Федеральный закон РФ № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://old.economy.gov.ru/minec/documents/doc1259754338763>

92. *Филатов, Д. А.* Применение возобновляемых источников энергии для повышения эффективности электроснабжения сельскохозяйственных предприятий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Филатов Дмитрий Алексеевич. – Нижний Новгород, 2016. – 18 с.

93. *Фоменков, А. П.* Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий / А. П. Фоменков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1984. – 288 с.

94. *Хорольский, В. Я.* Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, Д. В. Петров. – Ростов н/Д : ООО «Терра», 2004. – 168 с.

95. *Шелубаев, М. В.* Обоснование параметров ветроэлектрической станции на базе ветроэнергетических установок малой мощности для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Шелубаев Максим Викторович. – Челябинск, 2015. – 156 с.

96. *Шидловский, А. К.* Расчет электрических нагрузок систем электропитания промышленных предприятий / А. К. Шидловский, Г. Я. Вагин, Э. Г. Куренный. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

97. *Щитова, А. Н.* Российский ТЭК : реальность и прогнозы / А. Н. Щитова // Инновационная экономика : матер. Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2014 г.). – Казань : Бук, 2014. – С. 35–38.

98. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко [и др.]. – М. : Колос, 2000. – 536 с. – ISBN 5-10-003172-7.

99. 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.

100. *Ackermann, T.* Distributed generation: a definition / T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder // Electric Power Systems Research. – 2001. – Vol. 57. – Issue 3. – P. 195–204.

101. Autonomous power supply system based on a diesel generator and renewable energy sources for remote rural areas / I. I. Artyukhov [et al.] : 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018-Proceedings 19. – 2018. – P. 1–4.

102. A Generalized Quality Index of a Self-Contained Power Supply System / I. V. Atanov [et al.] // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89. – No. 7. – P. 428–431.

103. *Barade, M. G.* Design and Optimization of Photovoltaic-Diesel Generator-Battery Hybrid System for Off-grid Areas / M. G. Barade, A. Roy // International Journal of Current Engineering and Technology. MIT College of Engineering. (Pune, India). MECHPGCON 2016, INPRESSCO IJCET. – Special Issue 5 (June, 2016). – P. 344–353.

104. *Changjie, Y.* Diesel Generator Slow Start-Up Compensation by Supercapacitor for DC Microgrid Power Balancing / Y. Changjie, M. Sechilariu, F. Locment // IEEE International Energy Conference ENERGYCON 2016. – Apr 2016. – Leuven, Belgium, 2016.

105. Choice of the Method of Probabilistic Modeling of Statistical Dynamics of Autonomous Power Supply Systems / V. Khorol'skii [et al.] // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89. – No. 7. – P. 425–427.

106. Choosing a Power Source of Autonomous Energy-Power Supply of Technological Processes with System Testing for Stability / V. A. Glukharev [et al.] : HELIX. – 2019. – Vol. 9. – No. 4. – P. 5133–5138.

107. *Jordehi, A. R.* Allocation of distributed generation units in electric power systems : a review / A. R. Jordehi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – No. 56. – P. 893–905.

108. *Zhuikov, V.* Features of Compensation of a Reactive Power at the Transient / V. Zhuikov, I. Verbytskyi, O. Bondarenko // Electric Power Networks (EPNet). – 2016. – P. 1–4.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Основные технические характеристики электродвигателей серии АИР

Тип	P_n , кВт	n , мин^{-1}	КПД, %	$\cos \varphi$	I_n , А ($U = 380 \text{ В}$)	I_{Π} / I_n	M_{\max} / M_n	M_{Π} / M_n	Масса, кг
$2P, n = 3000 \text{ мин}^{-1}$									
9АИР50А2	0,09	2655	60	0,75	0,3	4,5	2,2	2,2	2,5
9АИР50В2	0,12	2655	63	0,75	0,39	4,5	2,2	2,2	2,8
9АИР56А2	0,18	2650	67	0,75	0,54	5,3	2,2	2,2	3,6
9АИР56В2	0,25	2710	68,85	0,75	0,74	5,3	2,2	2,2	3,9
9АИР63А2	0,37	2710	69,2	0,8	1,02	5,7	2,2	2,2	4,9
9АИР63В2	0,55	2710	72,06	0,81	1,43	5,7	2,3	2,2	5,7
9АИР71А2	0,75	2820	73,04	0,83	1,88	6,1	2,3	2,2	8,7
9АИР71В2	1,1	2820	78,67	0,82	2,59	6,7	2,3	2,2	9,4
9АИР80А2	1,5	2730	76,36	0,83	3,60	7,0	2,3	2,2	12,5
9АИР80В2	2,2	2820	79,75	0,84	4,99	7,0	2,3	2,2	15,2
9АИР90L2	3	2840	84,41	0,83	6,51	7,2	2,3	2,2	12
9АИР100S2	4	2850	81,21	0,89	8,41	7,5	2,3	2,2	26,2
9АИР100L2	5,5	2860	82,59	0,91	11,12	7,5	2,3	2,2	31,5
9АИР112M2	7,5	2860	84,84	0,91	14,76	7,2	2,4	2,2	40
9АИР132M2	11	2885	87,78	0,92	20,70	7,2	2,3	2,2	77,5
9АИР160S2	15	2920	88	0,86	30,11	7,1	2,4	2,2	116
9АИР160M2	18,5	2920	90	0,88	35,49	7,1	2,4	2,0	130
9АИР180S2	22	2920	90,5	0,89	41,50	7,2	2,5	2,1	160
9АИР180M2	30	2920	89,2	0,91	56,15	7,3	2,5	2,1	180
9АИР200M2	37	2920	91	0,87	71,01	7,1	2,4	2,1	220
9АИР200L2	45	2920	92	0,88	84,45	7,1	2,4	2,1	240

Продолжение прил. А

Тип	P_n , кВт	n , мин ⁻¹	КПД, %	cos φ	I_n , А ($U = 380$ В)	I_n / I_n	M_{max} / M_n	M_n / M_n	Масса, кг
9АИР225М2	55	2920	92,18	0,87	104,20	7,1	2,4	2,1	320
$4P, n = 1500$ мин ⁻¹									
9АИР56А4	0,12	1350	59,5	0,61	0,50	4,6	2,2	2,1	3,6
9АИР56В4	0,18	1350	61,56	0,63	0,71	4,9	2,2	2,1	3,9
9АИР63А4	0,25	1310	63,36	0,75	0,80	5,1	2,2	2,1	5
9АИР63В4	0,37	1310	64,92	0,77	1,12	5,1	2,2	2,1	5,6
9АИР71А4	0,55	1320	69,03	0,76	1,59	5,4	2,3	2,2	8,7
9АИР71В4	0,75	1320	65,94	0,8	2,16	5,7	2,3	2,2	9,5
9АИР80А4	1,1	1350	72,34	0,76	3,04	5,8	2,3	2,3	12
9АИР80В4	1,5	1390	75,84	0,76	3,95	6,2	2,3	2,3	13,9
9АИР90L4	2,2	1380	80,22	0,79	5,27	6,8	2,3	2,3	15
9АИР100S4	3	1380	79,52	0,8	7,17	7,0	2,3	2,3	23
9АИР100L4	4	1410	80,24	0,81	9,35	7,0	2,3	2,3	29
9АИР112М4	5,5	1410	84,3	0,823	12,04	6,6	2,3	2,3	38,5
9АИР132S4	7,5	1440	84,65	0,85	15,84	6,7	2,3	2,2	70
9АИР132М4	11	1447	85,42	0,85	23,02	6,8	2,3	2,2	83,5
9АИР160S4	15	1450	89	0,87	29,43	6,8	2,3	2,2	125
9АИР160М4	18,5	1450	90	0,89	35,09	6,8	2,3	2,2	142
9АИР180S4	22	1450	90,5	0,87	42,45	7,0	2,7	1,7	170
9АИР180М4	30	1450	92	0,87	56,95	7,0	2,7	1,7	190
9АИР200М4	37	1450	92,5	0,89	68,29	7,0	2,3	2,2	245
9АИР200L4	45	1450	92,5	0,89	83,05	6,9	2,4	2,2	270
9АИР225М4	55	1470	88,17	0,88	107,70	6,7	2,3	2,2	335

Окончание прил. А

Тип	P_H , кВт	n , мин ⁻¹	КПД, %	cos φ	I_H , А ($U = 380$ В)	I_{II} / I_H	M_{max} / M_H	M_{II} / M_H	Масса, кг
$6P, n = 1000$ мин ⁻¹									
9АИР63А6	0,18	870	54,5	0,65	0,77	4,1	2,0	1,9	4,7
9АИР63В6	0,25	870	56,8	0,68	0,98	4,0	2,0	1,9	5
9АИР71А6	0,37	910	61,5	0,69	1,32	4,7	2,0	1,9	8,3
9АИР71В6	0,55	910	64,01	0,7	1,87	4,7	2,0	1,9	10
9АИР80МА6	0,75	910	69,0	0,72	2,29	5,3	2,1	2,0	12
9АИР80МВ6	1,1	910	72,32	0,76	3,04	5,3	2,1	2,0	15,3
9АИР90L6	1,5	920	75,05	0,72	4,22	6,0	2,1	2,0	19
9АИР100L6	2,2	910	72,77	0,76	6,04	6,3	2,1	2,0	27,3
9АИР112МА6	3	930	78,85	0,76	7,61	5,7	2,2	2,1	33,4
9АИР112МВ6	4	930	79,72	0,78	9,77	5,7	2,1	2,1	38,8
9АИР132S6	5,5	950	79,15	0,79	13,36	6,3	2,1	2,1	68,5
9АИР132М6	7,5	955	80,6	0,83	17,03	6,2	2,2	2,1	81,5
9АИР160S6	11	965	87	0,82	23,43	6,3	2,2	2,0	125
9АИР160М6	15	965	89	0,82	31,23	6,5	2,2	2,0	155
9АИР180М6	18,5	965	89,5	0,85	36,95	6,6	2,1	2,1	180
9АИР200М6	22	965	90	0,83	44,75	6,3	2,2	2,1	225
9АИР200L6	30	965	90	0,85	59,58	6,5	2,2	2,1	250
9АИР225М6	37	980	88,77	0,82	77,23	6,6	2,1	2,1	305
9АИР250S6	45	980	92,5	0,85	86,96	6,7	2,2	2,1	390
9АИР250М6	55	980	92,5	0,86	105,05	6,8	2,3	2,2	430

Таблица 2.1 – Основные технико-экономические показатели дизель-генераторов, представленные на российском рынке

№ п/п	Название фирмы	Модель/ марка установки	Мощность		Частота вращения, мин ⁻¹	Расход топлива, л/ч	Цена
			кВ·А	кВт			
1	Азимут	<u>АД 8-Т400/AZIMUT Z164B</u>	10	8	1500	2,5	243100-622500
2		<u>АД 10-Т400/AZIMUT Z164D</u>	12,5	10	1500	3,15	245500-624900
3		<u>АД 12-Т400/ AZIMUT Z164D</u>	15	12	1500	3,77	254300-633700
4		<u>АД 15-Т400/AZIMUT Z164E</u>	18,75	15	1500	4,61	283000-677400
5		<u>АД 16-Т400/ AZIMUT Z164E</u>	20	16	1500	4,61	283000-677400
6		<u>АД 20-Т400/ AZIMUT Z184F</u>	25	20	1500	6,14	301700-696100
7		<u>АД 24-Т400/ AZIMUT Z184G</u>	30	24	1500	6,6	345100-739500
8		<u>АД 30-Т400/AZIMUT Z184H</u>	37,5	30	1500	8,28	358700-753100
9		<u>АД 40-Т400/ AZIMUT Z224D</u>	50	40	1500	11	429600-824000
10		<u>АД 50-Т400/AZIMUT Z224E</u>	62,5	50	1500	13,8	452800-847200
11		<u>АД 60-Т400/ AZIMUT Z224F</u>	75	60	1500	19,7	486200-884200
12		<u>АД 70-Т400/AZIMUT Z224G</u>	87,5	70	1500	19,6	603400-1023000
13		<u>АД 75-Т400/</u>	93,75	75	1500	21	669200-1134800
14		<u>АД 100-Т400/ AZIMUT Z274D</u>	125	100	1500	25,3	657600-1099000
15		<u>АД 120-Т400/</u>	150	120	1500	30	730500-1171900
16		<u>АД 140-Т400/ AZIMUT Z274G1</u>	175	140	1500	35,9	948600-1397900
17		<u>АД 150-Т400/ AZIMUT Z274G</u>	187,5	150	1500	38	969300-1816300

Продолжение прил. Б

№ п/п	Название фирмы	Модель/ марка установки	Мощность		Частота вращения, мин ⁻¹	Расход топлива, л/ч	Цена
			кВ·А	кВт			
1	Кама Энергетика	<u>I-25S/STAMFORD PI144G</u>	25	20	1500	7	612 000
2		<u>C-20S/STAMFORD UCI224D</u>	27	21,6	1500	6,7	602 000
3		<u>I-25S/ STAMFORD PI144G</u>	30	24	1500	7,7	622 000
4		<u>C-30S/ STAMFORD UCI224D</u>	39	31,2	1500	9,3	662 000
5		<u>M-30S/ STAMFORD PI144J</u>	40	32	1500	9,6	
6		<u>I-30S/ STAMFORD PI144J</u>	40	32	1500	9,1	696000
7		<u>C-40M/ MECC ALTE ECO32-1L/4</u>	50	40	1500	12,8	712 000
9		<u>C-50S/STAMFORD UCI224E</u>	60	48	1500	12,9	722 000
10		<u>I-50S/STAMFORD UCI224E</u>	60	48	1500	13,4	767 000
11		<u>M-50S/STAMFORD UCI224E</u>	60	48	1500	13,5	
12		<u>V-60S/STAMFORD UCI224F</u>	72,5	58	1500	16,7	857 000
13		SDMO	K16	15	12	1500	4,9
14	K17M		15,5	12	1500	4,8	900600
15	K22		19,5	15,6	1500	4,8	905000
16	T22K		20	16	1500	6,2	853 000
17	J22		20	16	1500	7	898 000
18	T25KM		22.7	19.3	1500	8,2	
19	K28H		25	20,1	1500	9,2	914957
20	K33		33	24	1500	7.5	974900

Продолжение прил. Б

№ п/п	Название фирмы	Модель/ марка установки	Мощность		Частота вращения, мин ⁻¹	Расход топлива, л/ч	Цена
			кВ·А	кВт			
21	Техника Созидание Сервис (ТСС)	<u>Дизель-генератор</u> АД-10 (Perkins)/ <u>Leroy-Somer LSA</u>	11	10	1500	2,7	715000
22		<u>Дизель-генератор</u> АД-10 (MM3)/ <u>Leroy-Somer LSA 40</u>	11	10	1500	3,5	455300
23		<u>Дизель-генератор</u> АД-12 (Perkins)/ <u>Leroy-Somer LSA 4</u>	13	12	1500	3,1	735 000
24		<u>Leroy-Somer LSA 40 S3</u>	13	12	1500	4,0	455 000
25		<u>Дизель-генератор</u> АД-15 (Perkins)/ <u>Leroy-Somer LSA 4</u>	17	15	1500	3,7	770 000
26		<u>Дизель-генератор</u> АД-15 (MM3)/	17	15	1500	5,0	468 000
27		<u>Дизель-генератор</u> АД-16 (Perkins)/	18	16	1500	4,0	775 000
28		<u>Дизель-генератор</u> АД-16 (MM3)/ <u>Leroy-Somer LSA 40</u>	18	16	1500	5,2	470 000
29		<u>Дизель-генератор</u> АД-18 (MM3)/ <u>Leroy-Somer LSA 40</u>	20	18	1500	5,6	473 000
30		<u>Дизель-генератор</u> АД-20 (John Deere)/ <u>LSA</u>	22	20	1500	4,7	787 000
31		<u>Дизель-генератор</u> АД-20 (Perkins)/ <u>PRO18S B/4</u>	22	20	1500	4,5	815 000

* Цены носят информативный характер (не для коммерческих целей).

Таблица 2.2 – Основные характеристики ЭГУ: SDMO K 16 и SDMO K 28H

Наименование	<u>SDMO K 16</u>	<u>SDMO K28 H</u>
Основные характеристики:		
Пуск	Электростартер	Электростартер
Мощность номинальная	12 кВт	20.1 кВт
Мощность максимальная	13.2 кВт	22.4 кВт
Мощность в кВА	15 кВА	25 кВА
Напряжение	230/400 В	230/400 В
Исполнение	открытое	открытое
Двигатель:		
Производитель двигателя	Kohler	Kohler
Система охлаждения	жидкостная	жидкостная
Топливная система		
Топливо	дизель	дизель
Расход топлива при 50% нагрузке	2,7	5,4
Расход топлива при 75% нагрузке	3.7 л/ч	7,5 л/ч
Расход топлива при 100% нагрузке	4,8	9,6
Объем топливного бака	50 л	100 л
Генератор		
Производитель генератора	SDMO	SDMO
Число фаз	3	3
Частота	50 Гц	50 Гц
Тип генератора	Синхронный	Синхронный
Дополнительные характеристики:		
Степень защиты	IP 23	IP 23
Серия	Adriatic	Adriatic
Массогабаритные характеристики		
Масса	410 кг	500 кг
Длина	1410 мм	1700 мм
Ширина	720 мм	900 мм
Высота	1020 мм	1120 мм

*Данные с электронного ресурса носят информативный характер.

Таблица 3.1 – Расчетная мощность для запускаемого двигателя
для матрицы эксперимента (по теоретическим данным)

№ комбинации	Порядок запуска				Расчетная мощность для запускаемого двигателя, кВт·А			
	1	2	3	4	S_1	S_2	S_3	S_4
1	7,5	5,5	4	1,5	22,1	24,5	27,8	24,5
2	7,5	5,5	1,5	4	22,1	24,5	19,6	29,9
3	7,5	4	5,5	1,5	22,1	21,4	29,4	24,5
4	7,5	4	1,5	5,5	22,1	21,4	18,2	31,5
5	7,5	1,5	5,5	4	22,1	13,2	26,6	29,9
6	7,5	1,5	4	5,5	22,1	13,2	23,5	31,5
7	5,5	7,5	4	1,5	16,2	28,5	27,8	24,5
8	5,5	7,5	1,5	4	16,2	28,5	19,6	29,9
9	5,5	4	7,5	1,5	16,2	19,5	33,4	24,5
10	5,5	4	1,5	7,5	16,2	19,5	16,2	35,5
11	5,5	1,5	7,5	4	16,2	11,3	30,6	29,9
12	5,5	1,5	4	7,5	16,2	11,3	21,5	35,5
13	4	7,5	5,5	1,5	13,1	27,1	29,4	24,5
14	4	7,5	1,5	5,5	13,1	27,1	18,2	31,5
15	4	5,5	7,5	1,5	13,1	21,1	33,4	24,5
16	4	5,5	1,5	7,5	13,1	21,1	16,2	35,5
17	4	1,5	7,5	5,5	13,1	9,8	29,1	31,5
18	4	1,5	5,5	7,5	13,1	9,8	23,2	35,5
19	1,5	7,5	5,5	4	4,9	24,2	26,6	29,9
20	1,5	7,5	4	5,5	4,9	24,2	23,5	31,5
21	1,5	5,5	7,5	4	4,9	18,2	30,6	29,9
22	1,5	5,5	4	7,5	4,9	18,2	21,5	35,5
23	1,5	4	7,5	5,5	4,9	15,2	29,1	31,5
24	1,5	4	5,5	7,5	4,9	15,2	23,2	35,5

Таблица 3.2–Потребляемая мощность запускаемых электродвигателей для матрицы эксперимента (по результатам измерений)

№ комбинации	Порядок запуска				Потребляемая узлом электродвигательной нагрузки, кВт·А			
	1	2	3	4	S1	S2	S3	S4
1	7,5	5,5	4	1,5	20,6	23,0	27,0	23,0
2	7,5	5,5	1,5	4	20,6	22,5	18,0	29,4
3	7,5	4	5,5	1,5	20,6	20,0	27,4	23,0
4	7,5	4	1,5	5,5	20,6	19,5	16,7	29,9
5	7,5	1,5	5,5	4	20,6	12,5	25	29,4
6	7,5	1,5	4	5,5	20,6	12,0	21,5	29,9
7	5,5	7,5	4	1,5	15,0	26,0	27,0	23,0
8	5,5	7,5	1,5	4	14,6	26,4	18,0	29,4
9	5,5	4	7,5	1,5	14,6	18,5	31,0	23,0
10	5,5	4	1,5	7,5	14,6	18,5	14,8	32,2
11	5,5	1,5	7,5	4	14,6	10,3	28,5	29,4
12	5,5	1,5	4	7,5	14,6	10,5	20,9	32,2
13	4	7,5	5,5	1,5	12,2	24,9	27,4	23,0
14	4	7,5	1,5	5,5	12,2	25,0	16,7	29,9
15	4	5,5	7,5	1,5	12,2	19,3	31,5	23,0
16	4	5,5	1,5	7,5	12,2	19,3	14,9	33,8
17	4	1,5	7,5	5,5	12,2	9,1	26,5	29,9
18	4	1,5	5,5	7,5	12,2	9,1	21,3	32,7
19	1,5	7,5	5,5	4	4,4	21,8	24,9	29,4
20	1,5	7,5	4	5,5	4,4	21,8	23,1	29,9
21	1,5	5,5	7,5	4	4,4	16,6	27,6	29,4
22	1,5	5,5	4	7,5	4,4	16,6	20,9	31,9
23	1,5	4	7,5	5,5	4,4	14,6	26,3	29,9
24	1,5	4	5,5	7,5	4,6	14,6	21,3	32,1

Рекомендации для электропитания средств малой механизации
сельского хозяйства от ЭГУ

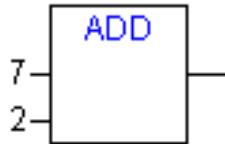
Наименование	Произ- води- тель- ность	Потребля- емая мощ- ность	Электрогенераторная установка (ЭГУ)		
			мощность		модель/ марка установки*
			кВ·А	кВт	
ПЗК – 30 «Вепрь»	30	15	30	24	АД 24-Т400/ AZIMUT
ПЗК – 60 «Зубр»	40...60	16	30	24	АД 24-Т400/ AZIMUT
ПЗК – 100 «Бизон»	60...100	17,5	30	24	АД 24-Т400/ AZIMUT
ПЗК – 150 «Слон»	100...150	21	37,5	30	АД 30-Т400/AZIMUT
ПЗК – 200 «Мамонт»	150...200	27,5	50	40	АД 40-Т400/ AZIMUT
ОВС -25	12...25	9,5	18,75	15	АД 15-Т400/AZIMUT
МПО -50	37	9,5	18,75	15	АД 15-Т400/AZIMUT
ЗС-90	До 90	10,25	18,75	15	АД 15-Т400/AZIMUT
ЗС-90МР-1-Ч	До 90	9,5	18,75	15	АД 15-Т400/AZIMUT
ЗМСН-90-21м	90	9,05	18,75	15	АД 15-Т400/AZIMUT
ЗМСН-100-21м	100	9,05	18,75	15	АД 15-Т400/AZIMUT
ПЗМ-170	170	13,55	30	24	АД 24-Т400/ AZIMUT

* Модель / марка установки носят информативный характер (представлены в качестве примера).

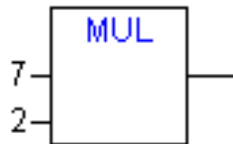
Библиотека функциональных блоков CoDeSyS

Арифметические операторы

ADD – Сложение переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

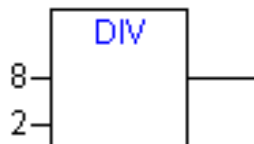


MUL – Перемножение значений переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

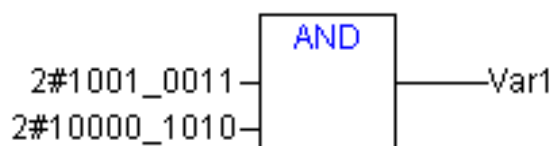


SUB – Вычитание значений переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

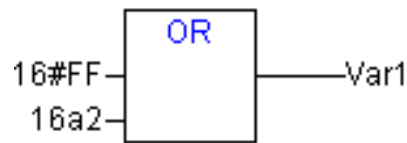
DIV – Деление значений переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

Битовые операторы

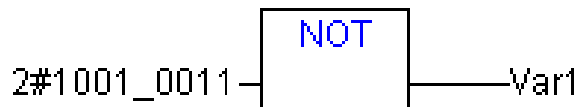
AND – Побитное **И**. Операция применима к типам BOOL, BYTE, WORD или DWORD.



OR – Побитное **ИЛИ**. Операция применима к типам BOOL, BYTE, WORD или DWORD.



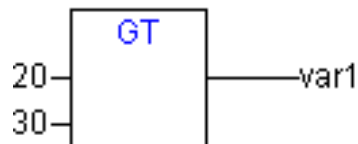
NOT – Побитное **НЕ**. Операция применима к типам BOOL, BYTE, WORD или DWORD.



Операторы сравнения

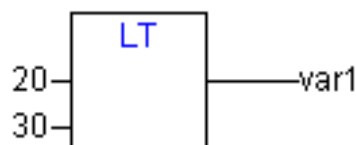
GT – Больше. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра больше второго.



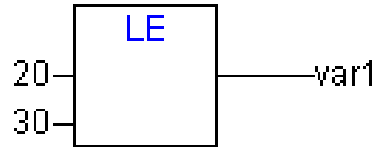
LT – Меньше. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра меньше второго.



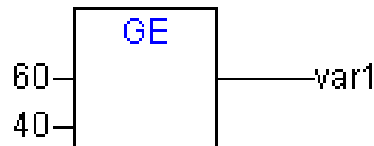
LE – Меньше или равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра меньше или равно второму.



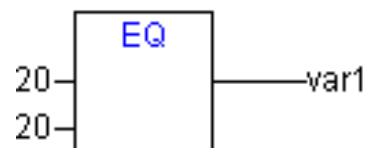
GE – Больше или равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра больше или равно второму.



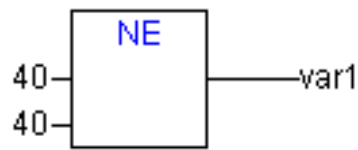
EQ – Равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра равно второму.



NE – Не равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

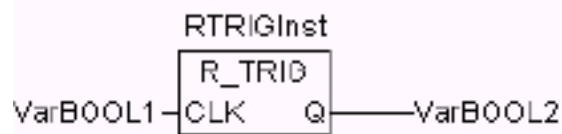
Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра не равно второму.



Детекторы импульсов

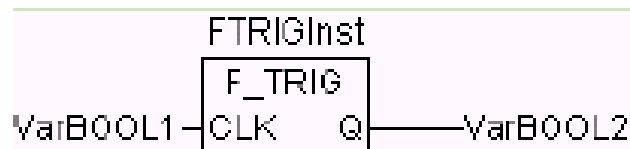
Функциональный блок **R_TRIG** генерирует импульс по переднему фронту входного сигнала.

Выход Q равен FALSE до тех пор, пока вход CLK равен FALSE. Как только CLK получает значение TRUE, Q устанавливается в TRUE. При следующем вызове функционального блока выход сбрасывается в FALSE. Таким образом, блок выдает единичный импульс при каждом переходе CLK из FALSE в TRUE.



Функциональный блок **F_TRIG** генерирует импульс по заднему фронту входного сигнала.

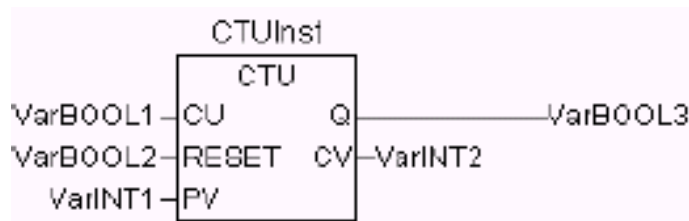
Выход Q равен FALSE до тех пор, пока вход CLK равен TRUE. Как только CLK получает значение FALSE, Q устанавливается в TRUE. При следующем вызове функционального блока выход сбрасывается в FALSE. Таким образом, блок выдает единичный импульс при каждом переходе CLK из TRUE в FALSE.



Счетчики

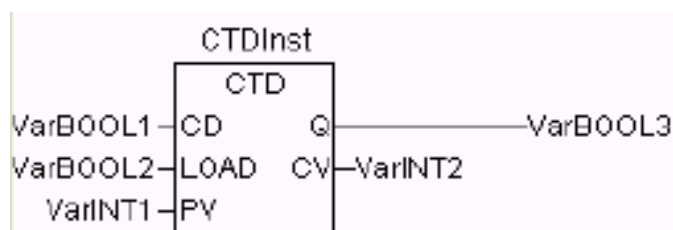
СТУ – Функциональный блок «инкрементный счетчик».

Входы CU, RESET и выход Q типа BOOL, вход PV и выход CV типа WORD. По каждому фронту на входе CU (переход из FALSE в TRUE) выход CV увеличивается на 1. Выход Q устанавливается в TRUE, когда счетчик достигнет значения заданного PV. Счетчик CV сбрасывается в 0 по входу RESET = TRUE.



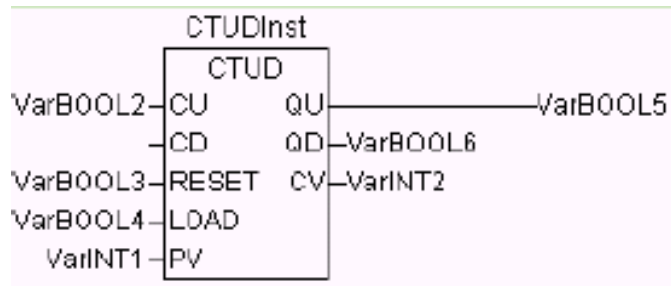
CTD – Функциональный блок «декрементный счетчик».

Входы CD, LOAD и выход Q типа BOOL, вход PV и выход CV типа WORD. По каждому фронту на входе CD (переход из FALSE в TRUE) выход CV уменьшается на 1. Когда счетчик достигнет 0, счет останавливается, выход Q переключается в TRUE. Счетчик CV загружается начальным значением, равным PV по входу LOAD = TRUE.



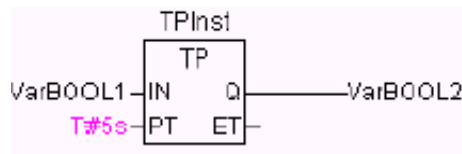
CTUD – Функциональный блок «инкрементный/декрементный счетчик».

Входы CU, CD, RESET, LOAD и выходы QU и QD типа BOOL, PV и CV типа WORD. По входу RESET счетчик CV сбрасывается в 0, по входу LOAD загружается значением PV. По фронту на входе CU счетчик увеличивается на 1. По фронту на входе CD счетчик уменьшается на 1 (до 0). QU устанавливается в TRUE, когда CV больше или равен PV. QD устанавливается в TRUE, когда CV равен 0.



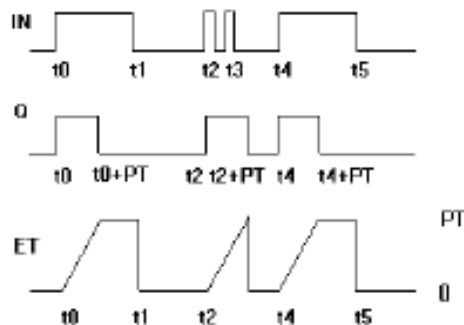
Таймеры

TP – Функциональный блок «таймер». TP(IN, PT, Q, ET) Входы IN и PT типов BOOL и TIME соответственно. Выходы Q и ET аналогично типов BOOL и TIME.

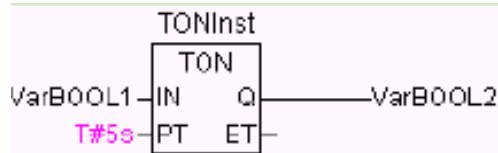


Пока IN равен FALSE, выход Q = FALSE, выход ET = 0. При переходе IN в TRUE выход Q устанавливается в TRUE и таймер начинает отсчет времени (в миллисекундах) на выходе ET до достижения длительности, заданной PT. Далее счетчик не увеличивается. Таким образом, выход Q генерирует импульс длительностью PT по фронту входа IN.

Временная диаграмма работы TP:

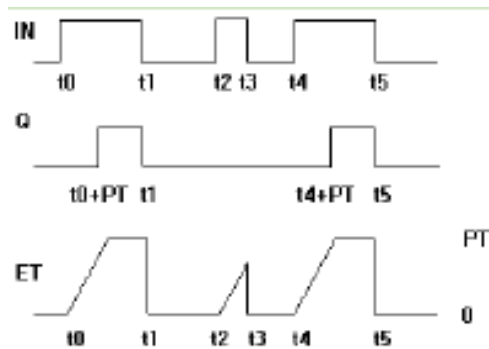


TON – Функциональный блок «таймер с задержкой включения». TON(IN, PT, Q, ET) Входы IN и PT типов BOOL и TIME соответственно. Выходы Q и ET аналогично типов BOOL и TIME.

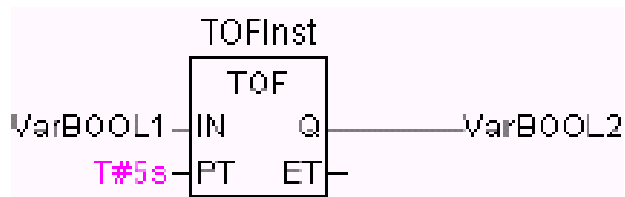


Пока IN равен FALSE, выход Q = FALSE, выход ET = 0. Как только IN становится TRUE, начинается отсчет времени (в миллисекундах) на выходе ET до значения, равного PT. Далее счетчик не увеличивается. Q равен TRUE, тогда IN равен TRUE и ET равен PT, иначе FALSE. Таким образом, выход Q устанавливается с задержкой PT от фронта входа IN.

Временная диаграмма работы TON:

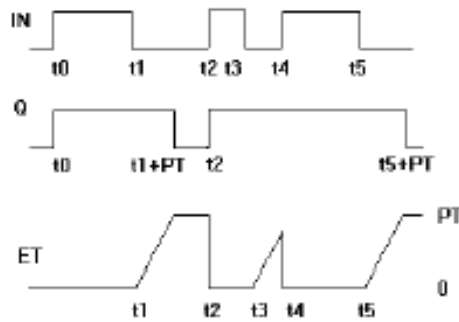


TOF – Функциональный блок «таймер с задержкой выключения». TOF(IN, PT, Q, ET) Входы IN и PT типов BOOL и TIME соответственно. Выходы Q и ET аналогично типов BOOL и TIME.



Если IN равен TRUE, то выход Q = TRUE и выход ET = 0. Как только IN переходит в FALSE, начинается отсчет времени (в миллисекундах) на выходе ET. При достижении заданной длительности отсчет останавливается. Выход Q равен FALSE, если IN равен FALSE и ET равен PT, иначе - TRUE. Таким образом, выход Q сбрасывается с задержкой PT от спада входа IN.

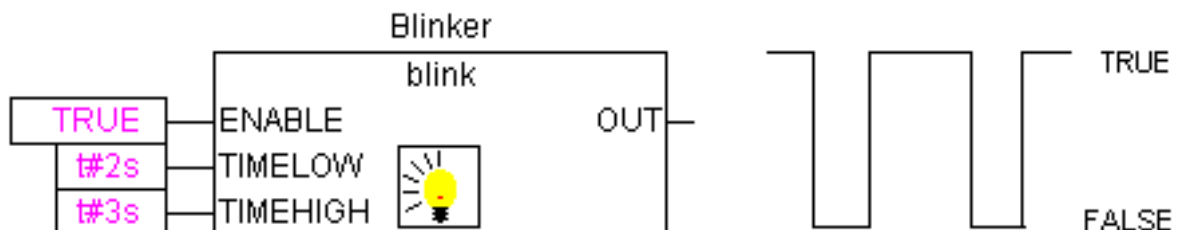
Временная диаграмма работы TOF:



Генераторы сигналов

BLINK – Функциональный блок «генератор прямоугольных импульсов». Входы: ENABLE типа BOOL, TIMELOW и TIMEHIGH типа TIME. Выход OUT типа BOOL.

Генератор запускается по входу ENABLE = TRUE. Длительность импульса задается TIMEHIGH, длительность паузы TIMELOW. При переходе ENABLE в FALSE, выход OUT остается в том состоянии, в котором он был в этот момент.



А К Т

г. Саратов

16 февраля 2018 г.

О внедрении (использовании) результатов диссертационной работы

Верзилина Андрея Александровича

Настоящий акт о том, что материалы кандидатской диссертационной работы Верзилина Андрея Александровича, в виде разработанной методики выбора мощности электростанции с двигателем внутреннего сгорания учитывающей особенности технологического процесса производства, использованы ООО «Корпорация Энергосистемы» при проектировании автономного электроснабжения.

Использование указанных материалов позволяет обосновать выбор конкретной модели генераторной установки по мощности с учетом ряда особенностей производственно-технологического процесса, влияющей в конечном итоге на объем капитальных и эксплуатационных затрат на автономное электроснабжение.

Генеральный директор
ООО «Корпорация Энергосистемы»



Карпов В.Ю.

УТВЕРЖДАЮ

ИИТ Глава К(Ф)Х Трушин С.Е.

Трушин С.Е.

«12» сентября 2019 г.

**А К Т****О ВНЕДРЕНИИ ЗАКОНЧЕННОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**

Мы ниже подписавшиеся, представитель ИП Глава К(Ф)Х «Трушин С.Е. С.Е. Трушин и представители ФГБОУ ВО «Саратовского ГАУ доктор технических наук, профессор Глухарев В.А., кандидат технических наук, доцент Попов И.Н., старший преподаватель Верзилин А.А, составили настоящий акт о том, что в условиях сельскохозяйственного предприятия ИП Глава К(Ф)Х «Трушин С.Е. внедрены результаты научно-исследовательской работы «Повышение энергоэффективности электрогенераторных установок обоснованием алгоритмов их нагружения многодвигательными асинхронными электроприводами сельхозмашин», выполненных в ФГБОУ ВО Саратовском ГАУ. В результате проведенной законченной работы получены следующие результаты:

1. Определена потребляемая мощности электроприводами зерноочистительной машины ОВС-25 путем проведения натурного обследования объекта и статистической обработки полученных данных.
2. Предложены способы повышения энергетической эффективности электрогенераторной установки путем обоснования требуемой мощности ЭГУ для автономного питания зерноочистительной машины ОВС-25 по разработанной методике: схема логического управления алгоритмом порядка запуска электроприводов ОВС-25, которая позволяет без ущерба для технологического процесса очистки зерна уменьшить мощность выбираемой ЭГУ на одну ступень с

25 до 15 кВА, т.е. в 1,67 раза. При этом достигнуты показатели энергоэффективности: расход топлива снизился на 26%, загрузка ЭГУ увеличилась на 30 %.

3. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составит около 73,5 тыс. руб.

От предприятия:
Техническая группа К(Ф)Х
 Трушин С.Е.

От университета:
Руководитель – д.т.н., профессор

 Глухарев В.А.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Попов И.Н.

Исполнитель – ст. преподаватель

 Верзилин А.А.