

*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

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова».

Научный руководитель – **Глухарев Владимир Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Степанов Сергей Федорович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры ««Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО СГТУ имени Гагарина Ю.А.»

**Пантелеева Лариса Анатольевна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электротехники, электрооборудования и электроснабжения»,  
ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия».

**Ведущая организация** – ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Отзывы на автореферат направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, e-mail: [chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Василий Васильевич Чекмарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Повышение эффективности технологических процессов на предприятиях сельхозпроизводства выступает необходимым условием устойчивого функционирования и поступательного развития сельскохозяйственной отрасли. Последовательное решение посвященных этому направлению задач 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 удается обеспечить энергоснабжение подобных объектов, оборудования или технологий от стационарных источников питания или распределительных электрических сетей. При этом в качестве неизбежной альтернативы одна треть перечисленных предприятий вынуждена применять для этих целей доступные и 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 20 000 ЭГУ, около 70% приходится на установки мощностью до 75 кВтА. Каждая приобретаемая ЭГУ выбирается по мощности подключаемой нагрузки. Основными потребителями электрогенераторных установок в сельхозпредприятиях являются электрифицированные передвижные машины и технологические установки, которые оснащены, обычно, 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 и технологию, и готовую продукцию в сравнении с энергоснабжением от стационарной электрической сети. Неотъемлемым фактором этого удорожания при выборе электрогенераторной установки выступает, в том числе необходимость обязательного превышения над суммарной мощностью подключаемого технологического оборудования номинальной мощности генератора ЭГУ, 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, на кВт·ч выработанной электроэнергии, расход топлива ДВС ЭГУ, увеличиваются вредные выбросы недогоревшего 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, с избытком, запас мощности, 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 сформулированного противоречия, нацеленное на повышение показателей энергоэффективности применяемых для автономного электропитания передвижных сельхозмашин электрогенераторных установок 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 и условия соизмеримости мощностей собственно генератора и отдельных электродвигателей и, дополнительно, оптимизируется последовательность подключения двигателей электропривода к ЭГУ, обеспечивающие повышение показателей энергоэффективности системы.

Работа выполнена в соответствии 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, состав сосредоточенной электродвигательной нагрузки различного с/х оборудования (средств механизации в с/х);
- 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 с/х оборудования (средств механизации в с/х) 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 с/х энергопотребляющего оборудования (средств механизации в с/х) 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 с/х оборудования (средств механизации в с/х).

**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 тех-нологическом процессе на требуемую мощность ЭГУ;
- разработан порядок расчета и выбора мощности ЭГУ для электроснабжения технологических процессов сельхозпредприятий;
- 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 расчета 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 с/х оборудования (средств механизации в с/х) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой;
- значения коэффициента соизмеримости, применяемые для оценки эффективности загрузки ЭГУ.

**Степень достоверности и апробация результатов** 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 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 1,2 печ. л. принадлежит лично соискателю.

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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В **первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследований»** проведен анализ современного технологического оборудования с многодвигательным электроприводом для сезонных операций и процессов сельхозпредприятий. Показано, что в установках для первичной обработки зерна и зернопогрузчиках применяются от 1 до 5 электродвигателей мощностью от 0,37кВт до 7,5 кВт. В электроприводах дождевальных машин в основном используются мотор-редукторы с единичной мощностью 0,55 кВт или 1,5 кВт на каждую секцию, количество секций – от 4 до 12.

Проанализированы технические характеристики ЭГУ российского и зарубежного производства, наиболее широко представленных на рынке производителей электростанций с двигателями внутреннего сгорания. Показано, что важной характеристикой энергоэффективности ЭГУ является удельный расход топлива, имеющий тенденцию к изменению соответственно загрузке генератора ЭГУ. Вследствие этого эффективность работы установки следует оценивать именно с учетом ее загрузки.

Анализ методик выбора мощности электрогенераторных установок показал, что основной подход, основывающийся на условии, когда номинальная мощность генератора  $P_{г.ном}$  должна быть больше максимальной нагрузки потребителя  $P_{max}$  или равняться ей, является ключевым, если в системе большое количество электроприемников и единичная мощность электродвигателей значительно меньше, чем мощность всей системы. Согласно общему условию определения мощности автономного источника питания, пиковая нагрузка не должна превышать перегрузочную способность ЭГУ ( $P_{пик.нагр} \leq P_{пер.ЭГУ}$ ). В этом случае расчетная мощность ЭГУ для автономного электроснабжения зачастую оказывается завышенной, что влечет за собой удорожание источника электрической энергии и увеличение эксплуатационных расходов, так как эти методы основываются на учете свойств потребителя и не учитывают особенностей определения соизмеримости мощности источника и многодвигательной нагрузки и ограничение источника по мощности.

Мощность ЭГУ должна покрывать суммарную электрическую нагрузку в системе электроснабжения, однако при этом важно исключить ее работу вхолостую. При выборе мощности автономного источ-



ника необходимо знать полную потребляемую мощность, которую следует представить функцией двух случайных аргументов:

$$S = f(U, I); \quad (1)$$

$$S = f(P, Q). \quad (2)$$

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

В случае, когда автономный источник обеспечивает производственную нагрузку, и основными электроприёмниками выступают асинхронные электродвигатели с характерными для них активно-реактивной нагрузкой и пусковыми токами, суммирование мощности следует выполнять с учетом кратности пусковой мощности запускаемых электродвигателей к номинальной. При прямом пуске асинхронный двигатель потребляет пусковой ток, в 5–7 раз превышающий номинальное значение. Несмотря на то, что данный способ коммутации является весьма жестким, в сельском хозяйстве он является основным способом пуска асинхронных электродвигателей в технологических схемах различного назначения. Это необходимо учитывать для возможности запуска самого мощного электроприёмника от ЭГУ, без предельного провала напряжения и возможной остановки первичного двигателя ЭГУ в момент запуска такого электроприёмника. В связи с этим при выборе мощности автономного источника питания одной из основных задач является определение влияния величины и характера электрической нагрузки на его работу.

Сформулированы цели и задачи исследования.

Во **второй главе «Теоретическое обоснование мощности ЭГУ для автономного питания многодвигательной сосредоточенной нагрузки»** представлен объект исследования и обоснован порядок определения и выбора требуемой мощности ЭГУ как автономного источника питания.

Теоретические исследования по определению мощности ЭГУ для автономного питания узла двигательной нагрузки нацелены на обоснование влияния порядка запуска асинхронных электродвигателей на значение мощности автономного источника питания; определение характерных границ исследование объекта; установления факторов, влияющих на величину загрузки ЭГУ.

Для определения границ исследования выбран узел двигательной нагрузки с характерной активно-реактивной нагрузкой и пусковыми характеристиками. Сельскохозяйственные машины и оборудование комплектуют асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором и номинальной мощностью от 0,12 до 45 кВт. Определено, что в основном

установленная мощность сельскохозяйственных агрегатов не превышает 100 кВт. Исследования проводили для сельскохозяйственных агрегатов с установленной мощностью с ограниченным количеством электроприемников и характерной сосредоточенной двигательной нагрузкой. Выявлено, что при питании от автономной системы соизмеримой мощности возможно нарушение устойчивости её работы, возникающее при резком увеличении нагрузки вследствие запусков электродвигателей, с мощностью близкой к мощности ЭГУ.

Величину нагрузки определяли расчетом полной мощности по общепринятым методикам, расчетную полную мощность электродвигателя в установившемся режиме – на основании его технических характеристик.

В момент пуска асинхронного электродвигателя существенно увеличивается реактивная составляющая мощности, обусловленная многократным превышением пускового тока над номинальным. Полную мощность для пускового режима электродвигателя определяли с учетом пусковых токов.

Выбирая мощность ЭГУ, необходимо учитывать перегрузочную способность генератора и особенности работы в длительном режиме двигателей внутреннего сгорания. ЭГУ должна обеспечивать пуск подключаемых электродвигателей. Для этого ЭГУ должна обеспечивать увеличение потребляемой мощности при пуске электродвигателя и способность выдерживать кратковременную перегрузку, которая ограничивается величиной тока короткого замыкания и для генераторов с АРВ составляет 300 % в течение 10 с.

Также следует учитывать, что рекомендованная загрузка ЭГУ с двигателями внутреннего сгорания в длительном режиме работы составляет 80-90 % от номинальной мощности ЭГУ.

Учитывая эти требования, представим условия для определения требуемой мощности ЭГУ в виде:

$$\begin{cases} S_{г(ЛТР)} \geq \sum_{i=1}^{n-1} S_p + S_n + S_{пр}; \\ S_{г(СОР)} \geq \sum_{i=1}^n S_p + S_{пр}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $S_{г(ЛТР)}$  – максимально допустимая мощность ЭГУ при внезапном увеличении нагрузки на электроагрегат, кВт·А;  $S_p$  – расчетная полная мощность работающего электродвигателя, кВт·А;  $S_n$  – пусковая мощность запускаемого электродвигателя, кВт·А;  $S_{г(СОР)}$  – мощность генератора ЭГУ при работе на постоянную нагрузку, кВт·А;  $S_{пр}$  – мощность прочей нагрузки, кВт·А.

Для многодвигательной нагрузки условие определения требуемой мощности ЭГУ примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{Г(ЛТР)} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_{д.i} K_{з.д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}} + \frac{P_{д.I} k_I}{\eta_{д.I} \cos \varphi_{д.I}}; \\ S_{Г(СОР)} \geq \sum_{i=1}^n \frac{P_{д.I} K_{з.д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}}, \end{array} \right. \quad (4)$$

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.

Рассмотрим два характерных случая, определяемых неравенствами (4).

1. Для установившегося длительного режима работы коэффициент загрузки генератора установки  $K_{з.г}$  должен стремиться к 0,8.

Так как коэффициенты загрузки электродвигателей различаются, введем параметр приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки  $K_{з.срв}$  для узла двигательной нагрузки. Величина усредненного коэффициента загрузки группы электродвигателей, отнесенная к коэффициенту загрузки ЭГУ:

$$K_{з.срв} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{з.д.i} P_{д.i}}{K_{з.г} \sum_{i=1}^n P_{д.i}}, \quad (5)$$

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

Таким образом, условие для определения номинальной мощности в длительном режиме работы ЭГУ примет вид:

$$S_{г.ном} \geq \sum_{i=1}^n \frac{P_{д.и}}{\eta_{д.и} \cos \varphi_{д.и}} K_{з.срв} . \quad (6)$$

Далее, в соответствии с неравенством (4), необходимо выполнить проверку каждого переходного режима на выполнение первого условия.

2. Для определения влияния номинальной мощности запускаемого электродвигателя на требуемую мощность ЭГУ рассмотрены случаи, когда самый мощный электродвигатель запускается первым или последним (рисунок 1).

Запуск самого мощного электродвигателя первым (см. рисунок 1, а) снижает вероятность возникновения пиковой загрузки генератора, тогда как при запуске его последним (см. рисунок 1, б) пусковой ток может значительно превосходить ток установившегося режима работы группы электродвигателей. Влияние пусковых токов электродвигателей должно быть учтено при определении требуемой мощности ЭГУ.

И.А. Сыромятников приводит формулу для определения допустимой мощности запускаемого электродвигателя исходя из реактивного переходного сопротивления ЭГУ, учитывающего возрастание токов в переходных процессах.

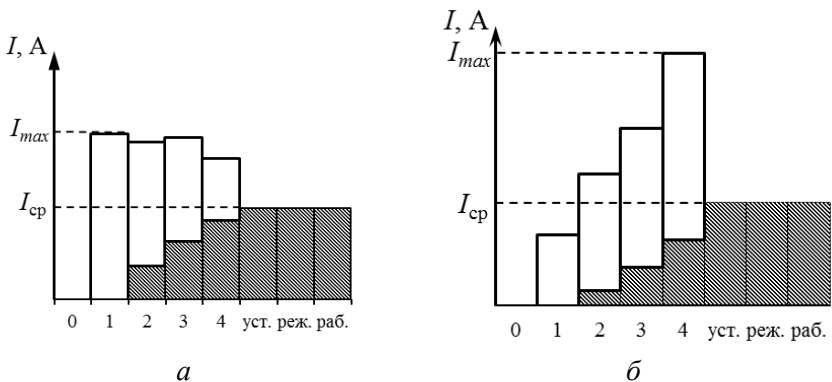


Рисунок 1 – Гистограмма пусковых токов: а – самый мощный электродвигатель запускается первым; б – самый мощный электродвигатель запускается последним;  $I_{max}$  – максимальное значение величины тока, А;  $I_{cp}$  – среднее значение тока в установившемся режиме работы, А;  $\square$  – величина пускового тока (переходный режим);  $\blacksquare$  – средняя величина тока в установившемся режиме

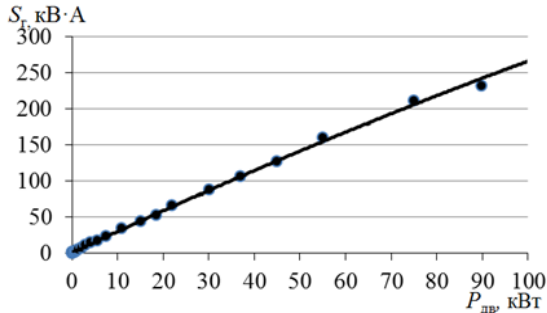
С учетом перегрузочной способности по току, неравенство для определения номинальной мощности ЭГУ примет вид:

$$S_{г.ном} \geq \frac{1,11k_I P_{д.I}}{\eta_{д.I} \cos \varphi_{д.I} K_L k_Q}, \quad (7)$$

где  $k_Q$  – коэффициент, учитывающий возможность перегрузки ЭГУ по току; 1,11 – коэффициент, учитывающий допустимую величину отклонения напряжения (отклонение номинального напряжения на зажимах электродвигателя не превышает 5 % от номинального напряжения ЭГУ);  $K_L$  – коэффициент, учитывающий перегрузочную способность первичного двигателя ДВС.

Определение зависимости изменения требуемой мощности ЭГУ от мощности запускаемого электродвигателя проведено по паспортным данным асинхронных электродвигателей унифицированной серии АИ мощностью от 1,1 до 100 кВт с использованием неравенства (7). Аппроксимация полученных значений требуемой мощности ЭГУ от показателей запускаемых электродвигателей представлена на рисунке 2.

Рисунок 2 – Зависимость требуемой мощности ЭГУ  $S_{Г}$  от мощности запускаемого электродвигателя  $P_{дв}$



Аналитическими исследованиями по определению номинальной мощности генератора ЭГУ (7), обеспечивающей запуск многодвигательного асинхронного электропривода, установлено, что номинальная мощность электродвигателя, подключаемого первым при прямом пуске, не должна превышать 45 % от номинальной мощности генератора ЭГУ.

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

$$S_{г.ном} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_{д.i}}{\eta_{д.i} \cos \varphi_{д.i}} K_{з.срв} + \frac{1,11k_I P_{д.I}}{\eta_{д.I} \cos \varphi_{д.I} K_L k_Q}. \quad (8)$$

Допустимый диапазон возможных мощностей очередных запускаемых электродвигателей, пуск которых обеспечивается после ранее запущенных, представлен на рисунке 3.

Выявлено влияние очередности запуска электродвигателей на расчетную мощность ЭГУ. Если номинальная мощность первого электродвигателя  $0,45P_{г.ном}$ , то мощность второго должна составлять не более  $0,25P_{г.ном}$ , а при имеющейся нагрузке 70% допустимая мощность запускаемого электродвигателя – не более  $0,13P_{г.ном}$ . В этом случае генератор обеспечит успешный прямой пуск асинхронных электродвигателей многодвигательного привода технологической машины. Кроме того, исключается необходимость применения других способов ограничения пусковой мощности асинхронных электродвигателей.

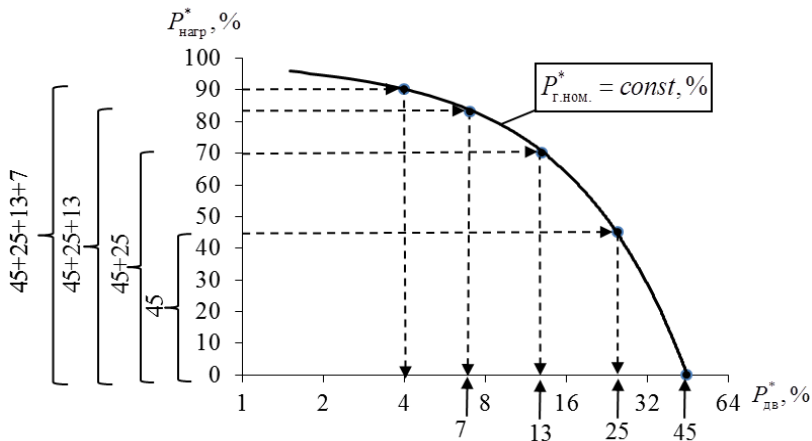


Рисунок 3 – Допустимое соотношение мощности «ЭГУ-нагрузка» при дискретном нагружении генератора

Для оценки взаимосвязи мощности узла электродвигательной нагрузки и выходной длительной мощности ЭГУ введен коэффициент соизмеримости, ограничивающий выходную длительную мощность электрогенераторной установки  $\bar{S}_{г(сop)}$  в установившемся режиме значением 80% от номинальной:

$$K^* = \frac{S_{г.ном}}{S_{нагр} \cdot 1,25}, \quad (9)$$

где  $S_{\text{нагр}}$  – полная мощность узла двигательной нагрузки; 1,25 – коэффициент ( $1,25 = \bar{S}_{\text{г.СОР}}^{-1}$ );  $S_{\text{г.ном}}$  – номинальная мощность выбранного генератора при выполнении условия (4).

Показатель загрузки ЭГУ с учетом  $\bar{S}_{\text{г.СОР}} = 0,8$  можно записать как:

$$K_{\text{з.г.}} = K^{*-1} \cdot \bar{S}_{\text{г.СОР}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

Выражение (10) является функцией связи зависимости коэффициента соизмеримости по отношению к загрузке ЭГУ в установившемся режиме работы (рисунок 4). Для системы «ЭГУ – узел электродвигательной нагрузки» коэффициент соизмеримости будет изменяться от 1 до 1,6. Необходимо стремиться, к минимальному значению коэффициента соизмеримости в частности, к единице, что достигается снижением мощности ЭГУ путем регламентирования очередности запуска электродвигателей. В случае, когда порядок запуска электродвигателей в технологическом процессе изменить нельзя, для уменьшения пиковой мгновенной потребляемой мощности потребуются применение устройств снижения или компенсации реактивной составляющей мощности повлиявшего электродвигателя этой группы, выявленного предлагаемым подходом.

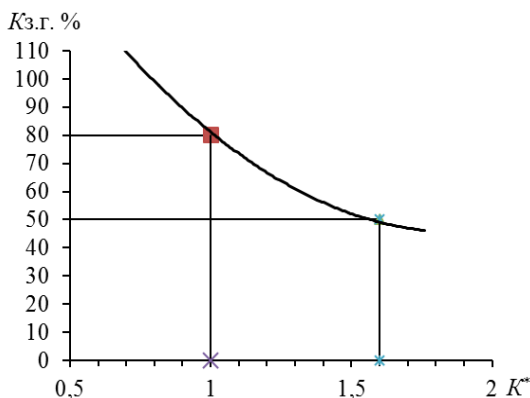


Рисунок 4 – Зависимость показателя загрузки ЭГУ ( $K_{\text{з.г.}}$  %) от коэффициента соизмеримости ( $K^*$ )

Таким образом, последовательность определения требуемой мощности электрогенераторной установки для автономного питания многодвигательного электропривода представляется следующим образом.

1. Определяют состав электроприемников и характеристики узла двигательной нагрузки. Выявляют количество, единичную мощность, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, кратность пускового тока электродвигателей по паспортным данным.

2. Анализируют технологический процесс оборудования. Определяют порядок запуска электродвигателей и группу электроприемников, которые могут быть включены одновременно.

3. Определяют требуемую номинальную мощность ЭГУ по формуле (6) для установившегося режима работы оборудования с учетом приведенного средневзвешенного коэффициента загрузки.

4. Анализируют влияние пусковых характеристик асинхронных электродвигателей на формирование пиковой мгновенной потребляемой мощности. Выполняют расчет мощности ЭГУ по формуле (8) с учетом расчетных значений пусковой мощности каждого запускаемого электродвигателя в порядке их запуска.

5. Сравнивают значения расчетных мощностей ЭГУ, вычисленных по формулам (6) и (8).

6. Выбирают ЭГУ, соответствующую по мощности.

7. Определяют коэффициент соизмеримости, добиваясь его минимального значения, близкого к единице. Если  $K^* > 1,6$ , следует рассматривать способы уменьшения пиковой мгновенной потребляемой мощности с помощью изменения порядка запуска электродвигателей в технологическом процессе или применения устройств снижения или компенсации реактивной мощности повлиявшего электродвигателя для заданного узла нагрузки.

Выбор мощности ЭГУ для электроснабжения узла двигательной нагрузки можно произвести в упрощенном виде, выполняя пункты 3–5 с использованием предлагаемой номограммы (рисунок 5). Для этого необходимо для каждого запускаемого электродвигателя в технологическом порядке найти точки расчетной мощности на номограмме и выбрать соответствующую по мощности генераторную установку.

Для иллюстрации закономерности влияния величины и характера двигательной нагрузки на требуемую мощность ЭГУ в качестве примера использования предложенной последовательности расчета выбран узел электродвигательной нагрузки, состоящий из группы асинхронных электродвигателей с номинальной мощностью 1,5 кВт; 4,0; 5,5; 7,5 кВт.

Для определения требуемой мощности ЭГУ сгенерированы возможные комбинации порядка запуска данного набора электродвигателей. В комбинаторике данная операция называется факториал нату-



рального числа  $n$  и интерпретируется как количество перестановок (упорядочивание) множества из  $n$  элементов. В таблице 1 представлены 6 характерных комбинаций.

Таблица 1 – Матрица комбинаций

Порядок запуска	Комбинации					
	1	13	7	11	9	24
$N$	1	13	7	11	9	24
1	7,5	4	5,5	5,5	5,5	1,5
2	5,5	7,5	7,5	1,5	4	4
3	4	5,5	4	7,5	7,5	5,5
4	1,5	1,5	1,5	4	1,5	7,5

На рисунке 5 приведены номограммы определения мощности ЭГУ с двигателем внутреннего сгорания для имеющегося мощного ряда электрогенераторных установок с ДВС российского производства. Даны примеры для комбинаций № 1 и 24 запуска асинхронных электродвигателей, представленных в таблице 1. Из номограмм видно, что для запускаемых электродвигателей можно выбрать ЭГУ с генератором мощностью:  $a - S = 30 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $b - S = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ .

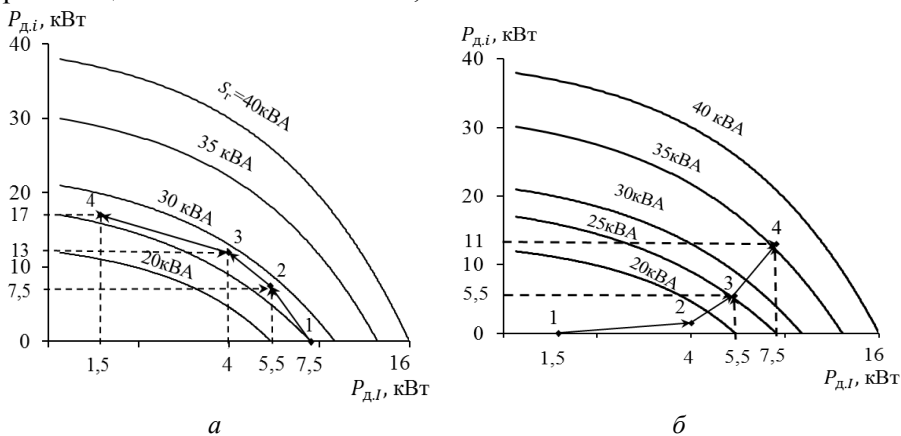


Рисунок 5 – Номограммы для определения мощности генератора ЭГУ:  $a$  – порядок запуска электродвигателей комбинации № 1;  $b$  – порядок запуска электродвигателей комбинации № 24;  $P_{d,i}$  – мощность  $i$ -го работающего(их) электродвигателя(ей);  $P_{d,l}$  – мощность  $l$ -го запускаемого электродвигателя.

Таким образом, определена область допустимого сочетания мощностей запускаемых электродвигателей и нагрузки генератора, при которых этот генератор обеспечит успешный запуск всех электродвигателей группы. Если мощность ЭГУ завышена и в установившемся режиме не обеспечивается загрузка генератора более 50 %, то для

уменьшения пиковых мгновенной потребляемой мощности для повлиявшего электродвигателя этой группы потребуется применение устройств снижения или компенсации реактивной составляющей мощности.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований и статистической обработки данных» изложены цели и задачи эксперимента, приведено описание измерительного комплекса для экспериментальных исследований и натурного исследования, описаны методики измерений и обработки экспериментальных данных.

Программа исследований включала в себя экспериментальное определение изменения величин тока и напряжения асинхронных электродвигателей в момент пуска и проверку влияния порядка запуска электродвигателей на требуемую мощность ЭГУ.

Для экспериментального исследования влияния величины и характера электрических нагрузок разработан экспериментальный стенд с логической схемой управления заданной последовательностью автоматического пуска многодвигательного электропривода. Функциональная схема и общий вид экспериментального стенда, показаны на рисунке 6 и рисунке 7 соответственно.

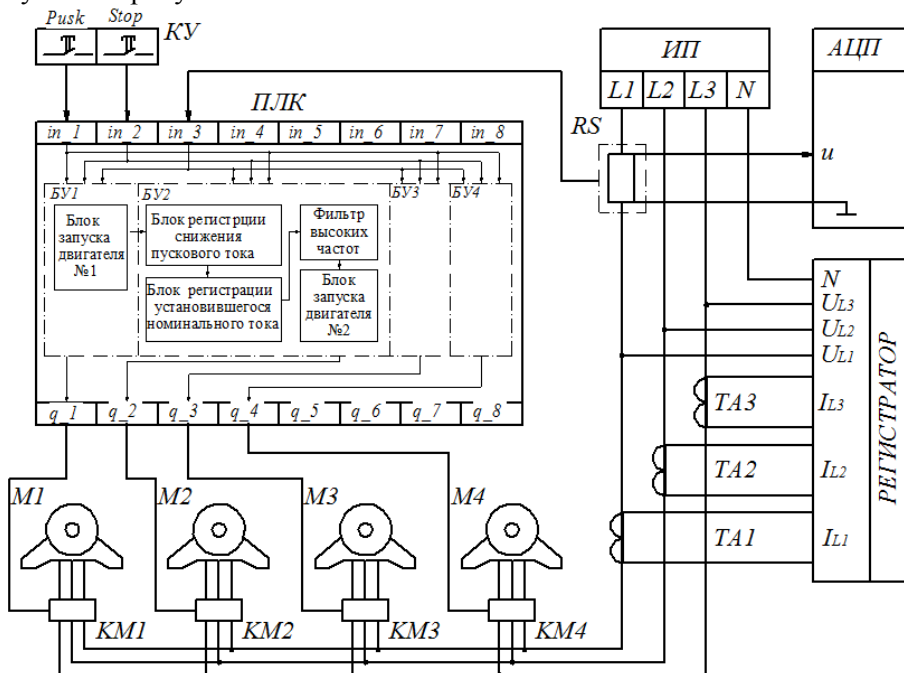
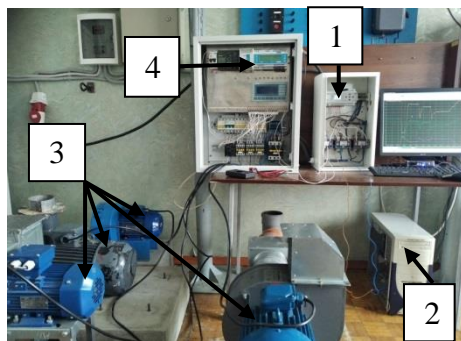


Рисунок 6 – Функциональная схема экспериментального стенда для исследования влияния очередности запуска электродвигателей на выходные показателя

тели 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,

Определение действующих величин тока и напряжения осуществлялось с помощью микропроцессорного регистратора электрических процессов РПМ-16-4-3. Для одновременной регистрации мгновенных значений напряжения  $u = f(t)$ , тока  $i = f(t)$ , использовалась плата аналого-цифрового преобразователя АЦП.

Рисунок 7 – 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.



Статистическую обработку экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний, проводили по критерию Шапиро – Уилка. Данный критерий основан на регрессионном анализе порядковых статистик по их ожидаемым значениям. Его применяют для обработки измеренных величин тока и напряжения группы асинхронных электродвигателей в пусковом и установившемся режимах их работы.

Определили среднее значение, дисперсию и доверительный интервал полной мощности через измеренные величины тока и напряжения с применением вероятностного подхода. Полную мощность нагрузки определяли для пускового и установившегося режимов работы электродвигателей, используя оценки математического ожидания  $M[UI]$  и среднеквадратичного отклонения  $S[UI]$ .

В четвертой главе «*Результаты экспериментальных исследований*» приведены результаты экспериментальных исследований и статистической обработки данных, а также выполнено сравнение результатов теоретических оценок требуемой мощности ЭГУ с экспериментальными данными.

Подтверждено теоретическое положение о влиянии мощности и очередности запуска электродвигателей на расчетную требуемую мощность генератора как автономного источника питания путем сопоставления расчетного (по неравенству (8)) и экспериментальных значений мощности по измеренным величинам тока и напряжения для возможных комбинаций.

Проведено сравнение экспериментальных и теоретических расчетов требуемой мощности генераторной установки (рисунок 8), которое показало, что отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований составляет 6,9 %. Это соответствует инженерной точности расчета и свидетельствует о совпадении теоретических и экспериментальных результатов.

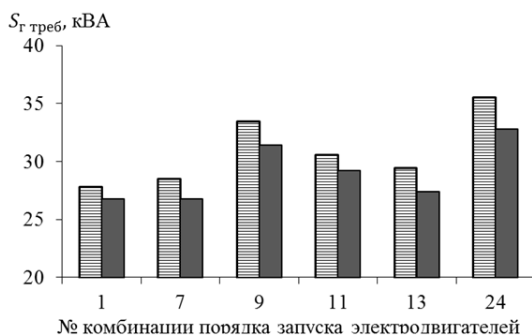




Рисунок 8 – Результаты экспериментального и теоретического расчетов требуемой мощности генераторной установки:  
 – теоретический расчет;  – экспериментальный  
 1,7,9,11,13,24 –номер комбинации (таблица 1)

Для практического подтверждения полученных результатов проведено натурное исследование зерноочистительной машины ОВС-25, запитанной от электрогенераторной установки ЭД12-Т400. Объект исследования представляет собой узел нагрузки, который содержит 4 асинхронных электродвигателя с короткозамкнутым ротором номинальной мощностью 1,1 кВт; 2,2; 2,2 и 4,0 кВт. Суммарная номинальная мощность – 9,5 кВт.

Результаты полевых измерений значений тока и напряжения были получены в табличной и графической формах. Временные диаграммы тока и напряжения в процессе запуска электрооборудования зерноочистительной машины ОВС-25, запитанной от электрогенераторной установки мощностью 15 кВт·А, представлены на рисунке 9.

Для зерноочистительной машины ОВС-25 расчетная мощность ЭГУ по предлагаемому порядку расчета составила 14,4 кВ·А и выбрана электрогенераторная установка номинальной мощностью 15 кВ·А.

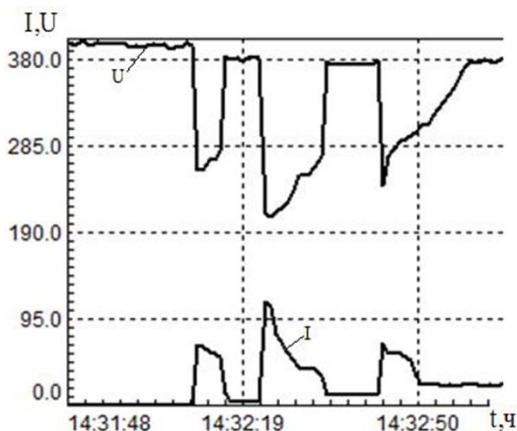


Рисунок 9 – Временные диаграммы тока и напряжения в процессе запуска электродвигателей ОВС-25, запитанной от ЭГУ

Для исследуемого объекта был произведен расчет требуемой мощности электрогенераторной установки с использованием традиционной (без учета порядка запуска двигателей) и предложенной методики. Результаты теоретических расчетов сопоставлены с результатами натурного исследования и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов требуемой мощности электрогенераторной установки узла двигательной нагрузки

По установленной мощности.	По предложенному подходу	По результатам измеренных величин
$S_{Г.НОМ} \geq 22 \text{ кВ} \cdot \text{А}$	$S_{Г.НОМ} \geq 14,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$	$S_{Г.НОМ} \geq 13,1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$
$S_{Г.НОМ} = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$	$S_{Г.НОМ} = 15 \text{ кВ} \cdot \text{А}$	

Сравнение результатов определения мощности электрических нагрузок и выбора ЭГУ показало, 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 кВА, т.е. в

1,67 раза. При этом показатели энергоэффективности в целом улучшаются: расход топлива снизится на 26%, КПД ЭГУ повысится за счет увеличения загрузки с 47% до 78%, удельная мощность кВА/кг для ЭГУ не изменяется (таблица 3).

Таблица 3 – **Результаты определения коэффициент загрузки и расхода топлива**

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

Таким образом, в предлагаемой методике выбора ЭГУ для автономного электроснабжения технологических процессов учтены рекомендации по загрузке источника питания в длительном режиме работы и перегрузочная способность ЭГУ.

В пятой главе *«Технико-экономическое обоснование предложенной методики по выбору мощности электрогенераторной установки»* рассчитаны разовые капиталовложения и годовой экономический эффект от применении разработанной методики определения требуемой мощности генераторной установки для питания электродвигательной нагрузки на примере зерноочистительной машины ОВС-25.

Экономическая эффективность (таблица 4) от применения предлагаемой методики определения требуемой мощности ЭГУ для питания электродвигательной нагрузки достигается за счет сокращения удельных капиталовложений в автономный источник питания и снижения эксплуатационных затрат и выражается в снижении удельного расхода топлива путем приведения загрузки ЭГУ к номинальной.

Таблица 4 – **Основные технико-экономические показатели предлагаемого подхода к выбору мощности ЭГУ для питания ОВС-25**

Показатель	ЭГУ № 1	ЭГУ № 2
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

Первоначальные капиталовложения в источник питания сократились на 205,0 тыс. руб., а экономический эффект составил 73,5 тыс. руб

## 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 с/х оборудования (средств механизации в с/х), 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 –  $0,45(P_{\text{ном}} - P_{\text{нагр}})$ .

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 загрузку порядка запуска электродвигателей использовать коэффициент соизмеримости источника питания и нагрузки. Рекомендуемой областью значений данного коэффициента является диапазон от 1 до 1,6. Увеличение  $K^* > 1,6$  применительно к узлу нагрузки свидетельствует о том, что загрузка ЭГУ в длительном режиме работы – 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 предлагаемой 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 процессов, операции которых выполняются различным с/х оборудованием (средствами механизации в с/х) с сосредоточенной электродвигательной нагрузкой.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

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

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. *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.

2. *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.

3. *Верзилин, А. А.* Определение мощности генератора источника электроснабжения в локальной энергетической системе / А. А. Верзилин, В. А. Глухарев, И. Н. Попов, М. В. Шляпников // Энергетик. – 2019. – № 2. – С. 16–18.

*В научных изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus*



4. *Verzilin, A. A.* Choosing a Power Source of Autonomous Energy-Power Supply of Technological Processes with System Testing for Stability / V. A. Glukharev, D. A. Solovyev, I. N. Popov, A. A. Verzilin, D. V. Sivitsky // HELIX. – 2019. – Vol. 9. – No. 4. – P. 5133–5138.

*В других изданиях*

5. *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.

6. *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.

7. *Верзилин, А. А.* Анализ методов расчета электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий / А. А. Верзилин, И. Н. Попов // Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : АЭТЕРНА, 2017. – С. 12–14.

8. *Верзилин, А. А.* Сравнительный анализ показателей газопоршневых установок в автономной системе энергоснабжения при использовании различных топлив / А. А. Верзилин, М. В. Новикова, В. А. Глухарев, И. Н. Попов // Инновационные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : матер. V Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2017. – С. 134–138

---

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16

Печ. л. 1,0

Тираж 100

Заказ

---