

На правах рукописи

ВАН АНТОН ГУНМИНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО
КОМПЛЕКСА СЕЗОННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ КРС**

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2026

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И. А. Будзко» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Виноградов Александр Владимирович**, доктор технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И. А. Будзко» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Осокин Владимир Леонидович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ

Зацепин Евгений Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрооборудование» ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

Ведущая организация РГУНХ Минсельхоза России

Защита состоится 10.12.2026 в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На фермах КРС в разное время суток происходят процессы доения, кормления животных, некоторые другие процессы. По времени года сезонность проявляется в первую очередь в процессах управления микроклиматом животноводческих предприятий, а также других процессах. Сезонность электрической нагрузки, таким образом, связана с изменением технологического процесса по времени суток в привязке к времени года. Поэтому ущерб от отключений электроэнергии также зависит от момента времени суток и года, в который произошло отключение и состава работающего в этот момент оборудования. Частота отказов в электрических сетях в разное время года и суток различна, что определяется сезонностью климатических факторов, а также сезонностью жизнедеятельности людей, работы предприятий. При этом поток отключений, с учётом аварийных и преднамеренных, может достигать 100 отключений в год на 100 км линий электропередачи, а суммарное время перерывов в электроснабжении часто выше 72 часов в год. Перебои в электроснабжении могут вызвать снижение удоев на 15% и более. Для сокращения ущербов от аварийных и плановых перерывов в электроснабжении выполняется резервное электроснабжение ответственного электрооборудования предприятий АПК. При этом изменение состава необходимого к резервированию в разное время суток и года электрооборудования в традиционных системах резервирования не учитывается. Это приводит к завышению мощности резервных источников электроснабжения и, соответственно, расходов на их эксплуатацию. Поэтому актуальной задачей является разработка программно-аппаратного комплекса для сезонного резервирования электроснабжения животноводческих предприятий КРС.

Степень разработанности темы. Проблеме повышения надёжности электроснабжения сельскохозяйственных объектов посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. Среди них можно выделить работы Будзко И.А., Зуля Н.М., Trojanowska M., Папкова Б.В., Лещинской Т.Б., Осокина В.Л., Zhu L., Jiang F., Luo M., Zafar M.H., посвященные методам расчёта

надёжности сельских электрических сетей, способам и средствам её повышения, Наумова И.В., Васильевой Т.Н., в которых выполняется исследование количества отказов в зависимости от сезонных причин, Зуля Н.М., Эбина Л.Э. Агаларова А.М. и других, посвященные порядку учёта отказов, методикам расчёта ущербов от перерывов в электроснабжении, Судаченко В. Н., Эрка А. Ф., Тимофеева Е. В., Виноградова А.В., Виноградовой А.В., в которых исследуются методики определения параметров надёжности электроснабжения с учётом сезонности, методики расчёта мощности источников резервирования, выполняется разработка устройств сезонного резервирования, работы других авторов. В то же время указанными авторами не решены вопросы разработки программно-аппаратного комплекса для повышения надёжности ферм КРС с учётом сезонности их технологического процесса.

Целью работы является рационализация мощности резервного источника электроснабжения животноводческого предприятия КРС, сокращение энергозатрат при его использовании посредством разработки программно-аппаратного комплекса сезонного резервирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- выполнить обоснование разработки способов и технических средств сезонного резервирования для рационализации мощности резервного источника электроснабжения животноводческого предприятия КРС, сокращения энергозатрат при его использовании;
- разработать регрессионную модель количества аварийных отключений электроэнергии в зависимости от месяца года и времени суток и методику определения вероятного ущерба животноводческих предприятий КРС от недоотпуска электроэнергии с учётом сезонности;
- разработать и обосновать способы сезонного резервирования, обеспечивающие рационализацию необходимой мощности резервного источника и снижение энергозатрат при его использовании с обеспечением

требуемой надёжности электроснабжения животноводческих предприятий КРС;

- разработать программно-аппаратный комплекс для реализации способов сезонного резервирования электроснабжения животноводческих предприятий КРС;
- выполнить технико-экономическое обоснование применения разработанного программно-аппаратного комплекса сезонного резервирования электроснабжения животноводческих предприятий КРС.

Объект исследования – системы электроснабжения животноводческих предприятий КРС.

Предметы исследования – сезонность отключений электроэнергии, мощность резервного источника электроснабжения предприятий КРС при использовании программно-аппаратного комплекса сезонного резервирования.

Методы исследования. В работе использован комплексный подход, включающий методы статистики, надёжности, математического и физического моделирования, фундаментальные основы электротехники, методы инженерного эксперимента.

Научная новизна заключается в:

- полученных зависимостях числа аварийных отключений в линиях 10 кВ от месяца года и времени суток для условий Дальневосточной распределительной сетевой компании;
- разработанной методике определения вероятного ущерба от недоотпуска электроэнергии предприятию КРС, позволяющей учесть зависимость числа аварийных отключений от месяца и времени суток;
- разработанных способах и алгоритмах реализации резервирования электроснабжения животноводческих предприятий, отличающихся учётом сезонного характера работы электрооборудования;
- разработанном программно-аппаратном комплексе сезонного резервирования электроснабжения предприятия КРС.

Теоретическая значимость заключается в разработанных способах, алгоритмах и технических средствах сезонного резервирования электроснабжения предприятий КРС, а также регрессионной модели и методике определения количества аварийных отключений электроэнергии с учётом сезонности. Теоретические исследования вносят вклад в исследование систем резервного электроснабжения и могут быть использованы при подготовке специалистов энергетических и агроинженерных профилей. Получены 2 патента на разработанные способы.

Практическая значимость. Применение разработанных способов и программно-аппаратного комплекса сезонного резервирования позволяет обеспечить надёжность электроснабжения и сокращение энергозатрат и затрат топлива при резервировании электроснабжения предприятий КРС. Разработанная методика позволяет рассчитывать вероятный ущерб от недоотпуска электроэнергии предприятию с учётом сезонности частоты отключений электроэнергии по месяцам и времени суток. Разработанное устройство внедрено в учебный процесс ФГБОУ ВО Дальневосточного ГАУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика определения вероятного ущерба от недоотпуска электроэнергии предприятию КРС позволяет учесть зависимость ущерба при аварийных отключениях от месяца и времени суток.
2. Разработанные способы сезонного резервирования электроснабжения животноводческих предприятий и алгоритмы их реализации обеспечивают необходимую надёжность и сокращение энергозатрат и затрат топлива при резервировании электроснабжения предприятий КРС.
3. Разработанный программно-аппаратный комплекс сезонного резервирования электроснабжения предприятия КРС позволяет реализовать разработанные способы сезонного резервирования и обеспечивает адресное подключение электрооборудования к резервному источнику электроснабжения с учётом календарного и суточного графика работы данного оборудования.

Реализация результатов исследования. Изготовленный программно-аппаратный комплекс сезонного резервирования прошёл лабораторные испытания и внедрён в учебном процессе в ФГБОУ ВО Дальневосточном ГАУ.

Вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследований, непосредственном участии в проведении теоретических исследований, обработке статистических данных, разработке методики определения вероятного ущерба от недоотпуска электроэнергии предприятию КРС и её апробации для условий дальневосточного региона, обработке полученных результатов, разработке экспериментального образца программно-аппаратного комплекса сезонного резервирования, планировании, проведении и обработке результатов лабораторных испытаний, апробации результатов исследований, написании диссертации, подготовке публикаций по выполненной работе.

Достоверность результатов подтверждена: сопоставимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными; использованием традиционных методических принципов современной науки и известных методов анализа и синтеза; непротиворечивостью математических выкладок и преобразований.

Апробация. Основные материалы и результаты научной работы докладывались и получили одобрение на Международных научно-технических конференциях в ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ФГБОУ ВО Дальневосточном ГАУ, ФГБОУ ВО Орловском ГАУ, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, в 2023-2026 годах, научно-практических семинарах в филиале ПАО «Россети Центр» - «Орёлэнерго» в 2024 -2026 годах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных статей, в том числе 3 работы в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, получено 2 патента на способы.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Диссертация изложена на 169 страницах, включает 37 рисунков, 16 таблиц и 120 наименований источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, степень её разработанности, определены цель и основные задачи исследования, отмечена научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, указаны примененные методы, приведены основные положения, выносимые на защиту, апробация работы.

В первой главе диссертации «Обоснование разработки способов и технических средств сезонного резервирования электроснабжения животноводческих предприятий КРС» выявлены особенности сезонности технологических процессов предприятий КРС. На фермах КРС к сезонным по времени суток можно отнести процессы доения, кормления животных, некоторые другие, а по времени года – процессы управления микроклиматом животноводческих предприятий. В течение суток и года изменяется состав работающего оборудования, электрическая нагрузка предприятия.

Выявлено влияние отключений электроэнергии на функционирование и производительность предприятий КРС. Так, перебои в электроснабжении могут вызвать снижение удоев на 15%, а зимой нанести материальный ущерб системе водоснабжения предприятия. Остановка холодильных камер приводит к тому, что теряется качество молока. В неохлажденном молоке быстро развиваются микроорганизмы, вызывающие его скисание. При температуре 32 °С через 10 ч кислотность молока повышается в 2,8 раза, а число бактерий возрастает в 40 раз.

Выполнен анализ способов и средств повышения надёжности электроснабжения сельских потребителей, в том числе сезонного резервирования. Выявлено, что одним из наиболее эффективных является применение резервных источников электроснабжения, в частности, дизель-генераторных установок (ДГУ) для группового резервирования электрооборудования производственных нагрузок предприятий КРС как показано, например, на рисунке 1. На схеме (рисунок 1) показаны: линия

электропередачи ЛЭП 10 кВ, коммутационный аппарат КА 10 кВ, трансформаторная подстанция ТП 10/0,4 кВ, коммутационные аппараты КА 0,4 кВ, секционный коммутационный аппарат СКА 0,4 кВ и резервный источник электроэнергии РИЭ 0,4 кВ.

Такие установки включаются при исчезновении напряжения в питающих предприятия линиях электропередачи (ЛЭП), как правило это ЛЭП 10 кВ, и подают питание на оборудование предприятия. Поэтому важно знать показатели надёжности именно электрических сетей 10 кВ и ТП 10/0,4 кВ.

Исследованы отключения в сельских электрических сетях 10 кВ на примере Дальневосточной распределительной сетевой компании (ДРСК). Изучены статистические данные на основе анализа журналов отключений за 2018 – 2024 гг. в электрических сетях ДРСК 10 кВ общей протяжённостью 12200 км. Суммарное количество отключений за этот период составило 3913. Среднее время восстановления для исследуемых сетей составило 9,16 ч, а среднее время восстановления электроснабжения – 4,88 ч.

Также получены значения других показателей надёжности. Выявлено, что отключения носят сезонный характер. На рисунке 2 показано усреднённое распределение количества отключений по месяцам и часам суток за период 2018-2024 гг. Выявлено, что существующие способы и технические средства резервирования не учитывают сезонность нагрузок и сезонность отключений электроэнергии. Мощность резервных источников электроснабжения (РИЭ), например ДГУ, или систем накопления электроэнергии (СНЭ), рассчитывается на всю расчётную нагрузку предприятия, или с учётом графика нагрузки. Это приводит к завышению мощности РИЭ, затрат топлива (в случае ДГУ) и

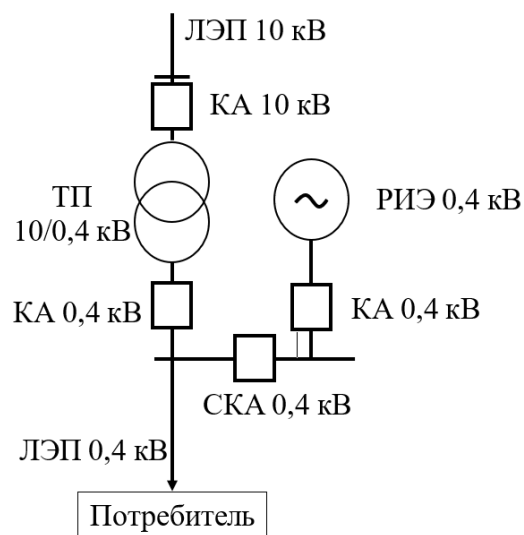


Рисунок 1 – Структурная схема резервирования с применением РИЭ, в качестве которого используется ДГУ, или СНЭ

энергозатрат при их эксплуатации. Часто для резервирования отдельных нагрузок прокладывают отдельные ЛЭП 0,4 кВ, что приводит к дополнительным капитальным вложениям. Существующие способы сезонного резервирования имеют недостатки, поскольку не позволяют осуществлять индивидуальное управление резервированием электрооборудования.

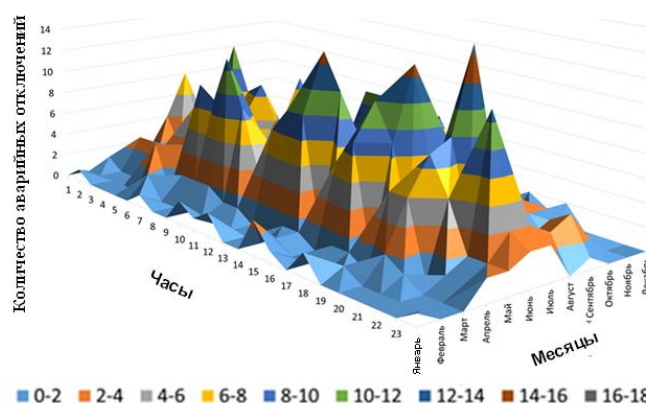


Рисунок 2 – Сводный график количества отключений по часам и месяцам за период 2018-2024 гг.

Сделан вывод, что требуется разработка новых способов и технических средств сезонного резервирования электроснабжения с целью снижения затрат топлива и энергозатрат при эксплуатации резервного источника электроснабжения животноводческих предприятий КРС. Суть сезонного резервирования заключается в том, что оборудование объекта разделяется по приоритетности его резервирования в зависимости от его задействованности в технологическом процессе в момент возникновения отключения электроэнергии. Если оборудование не задействовано в момент отключения, оно не должно в этот момент подключаться к резервному источнику. Также из резервирования исключается (или время его работы переносится) оборудование, не имеющее критического значения для осуществления технологического процесса.

Во второй главе диссертации «Разработка вероятностной модели ущерба от недоотпуска электроэнергии животноводческим предприятиям КРС» выполнено определение расчётной нагрузки предприятия КРС, содержащего две фермы КРС по 200 голов и телятник на 228 голов, (306 кВА), проанализирован график нагрузки, показана его суточная и годовая сезонность. На основе расчётной мощности и графика нагрузки, с применением существующих методик, определены варианты мощности РИЭ. При резервировании расчётной

мощности выбрана ДГУ АД-315С-Т400-1РМ2 мощностью 394 кВА, в случае резервирования с учётом графика нагрузки – АД-250С-Т400-1РМ11 мощностью 312,5 кВА. При использовании сезонного резервирования предполагается применение установки АД-180С-Т400-1РМ11 мощностью 225 кВА. Снижение мощности достигается за счёт исключения части оборудования из приоритета по резервированию в пиковые часы, что позволяет снизить потребляемую мощность и энергопотребление в эти часы.

Определены средние значения количества аварийных отключений по месяцам года и времени суток за период 2018 – 2024 гг. на примере ДРСК и получены уравнения регрессии, отражающие выявленные закономерности. На рисунках 3 и 4 показаны графики количества аварийных отключений по месяцам и времени суток и линии их аппроксимации.

Также на рисунках показаны зоны максимальной аварийности, то есть месяцы (часы), в которые количество отключений максимально.

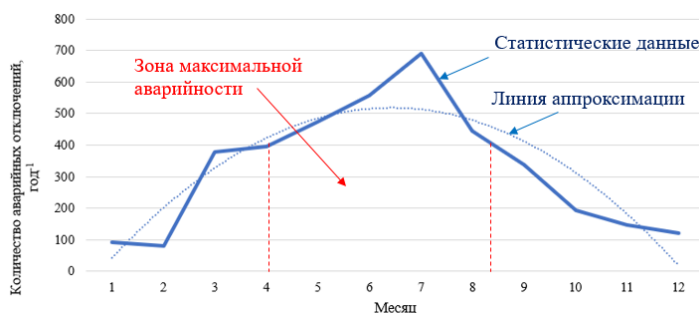


Рисунок 3 – Количество аварийных отключений по месяцам года

Уравнение регрессии, позволяющее определять количество отключений в заданном месяце года, Y_m , мес⁻¹, имеет вид:

$$Y_m = -16,163X_m^2 + 207,93X_m - 149,98, \quad (1)$$

где X_m – номер заданного месяца.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,7996$, что показывает хороший уровень соответствия статистических данных и данных регрессионной модели.

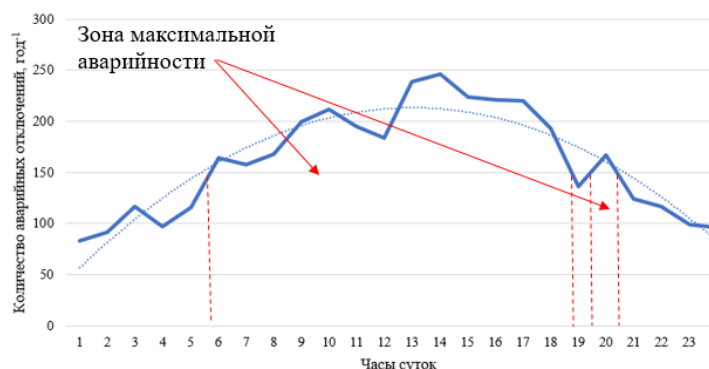


Рисунок 4 – Количество аварийных отключений по

Уравнение регрессии, позволяющее определять количество отключений в заданном часе суток, $Y_{ч}$, $ч^{-1}$, имеет вид:

$$Y_{ч} = -1,0826X_{ч}^2 + 28,185X_{ч} + 29,893, \quad (2)$$

где $X_{ч}$ – номер заданного часа.

Коэффициент детерминации, $R^2 = 0,8496$, показывает очень хороший уровень соответствия статистических данных и данных регрессионной модели.

Разработана методика определения вероятного ущерба от аварийных отключений. Методика заключается в следующем. Первым действием определяют вероятное количество отключений в заданный месяц по уравнению 1) и час (2).

Далее определяют относительную частоту отключений в заданный месяц, Y_M , и в заданный час, $y_{ч}$, по выражениям (3) и (4):

$$Y_M = \frac{Y_M}{\sum n_{ав.год}} = \frac{-16,163X_M^2 + 207,93X_M - 149,98}{3913} \quad (3)$$

$$y_{ч} = \frac{Y_{ч}}{\sum n_{ав.год}} = \frac{-1,0826X_{ч}^2 + 28,185X_{ч} + 29,893}{3913} \quad (4)$$

где $\sum n_{ав.год}$ – суммарное число аварийных отключений за наблюдаемый период (в данном случае за 2018-2024 гг.) для всей рассматриваемой сети. В нашем случае это 3913 отключений.

Далее определяют относительную частоту отключений в заданный час заданного месяца всей сети, для которой собраны статистические данные (L , км), $Y_{ч/м}$, $ч^{-1}$:

$$Y_{ч/м} = y_{ч} \cdot Y_M. \quad (5)$$

Следующим действием рассчитывают относительную вероятную частоту отключений в заданный час заданного месяца сети конкретного объекта (l , км), $Y_{об.ч/м}$, $ч^{-1}$:

$$Y_{об.ч/м} = \frac{Y_{ч/м} \cdot n_{ав\Sigma} \cdot l}{L}. \quad (6)$$

где $n_{ав\Sigma}$ – суммарное среднее количество отключений в год, $n_{ав\Sigma}$, $год^{-1}$. В нашем случае это 513 $год^{-1}$.

Далее вычисляют объём недоотпущенной электроэнергии для конкретного объекта, $W_{\text{ав.нед}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{откл.}}$:

$$W_{\text{ав.нед}} = Y_{\text{об.ч/м}} \cdot \sum_{\text{Чо}i}^{\text{Чм}i} P_{Ti} \cdot T_i, \quad (7)$$

где P_{Ti} – потребляемая мощность, согласно графику нагрузки в течение времени одинаковой нагрузки при i -м отключении, кВт; T_i – время одинаковой нагрузки при i -м отключении, ч; $\text{Чо}i$ – час времени начала i -го отключения; $\text{Чм}i$ – час времени окончания i -го отключения.

Далее, с учётом графика нагрузки объекта, определяют мощности в каждый час, в который присутствует перерыв в электроснабжении и получают значение недоотпущенной электроэнергии в i -й час, $W_{\text{ав.нед}i}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{откл.}}$.

Следующим шагом определяют вероятный совокупный ущерб от недоотпуска при каждом j -м отключении, $Y_{\text{ав.нед.откл}j}, \text{руб./откл.}$:

$$Y_{\text{ав.нед.откл}j} = \sum_{\text{Чо}}^{\text{Чм}} W_{\text{ав.нед}i} \cdot (Y_{\text{уд.в.нед}i} + T_{\text{ээ}i}), \quad (8)$$

где $T_{\text{ээ}i}$ – тариф на электроэнергию в заданные часы, соответствующие временному интервалу от отказа до восстановления, руб./кВт · ч; $Y_{\text{уд.в.нед}i}$ – удельный ущерб предприятия от недоотпуска электроэнергии в заданные часы, соответствующие временному интервалу от момента отключения до восстановления, руб./кВт · ч.

Определяется вероятный годовой совокупный ущерб от недоотпуска электроэнергии для отказов в разные часы (от 1 до 8760 ч для невисокосного года), $Y_{\text{ав.нед.откл}\Sigma}, \text{руб./откл.}$:

$$Y_{\text{ав.нед.откл}\Sigma} = \sum_1^{8760} Y_{\text{ав.нед.откл}j}, \quad (9)$$

На рисунке 5 показан, для примера, график вероятного совокупного ущерба от недоотпуска при каждом j -м отключении, рассчитанный для рассмотренного предприятия, содержащего ферму КРС и телятник.

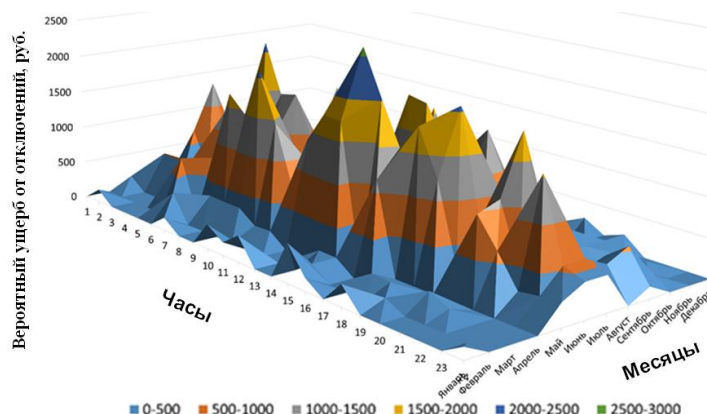


Рисунок 4 – Вероятный ущерб, рассчитанный для рассмотренного предприятия, содержащего ферму КРС и телятник

Для рассмотренного примера предприятия КРС, содержащего молочную ферму и телятник вероятный ущерб от отключений в течение года составляет 123165,5 руб. Снизить ущербы возможно за счёт применения способов сезонного резервирования, учитывающих особенности времени работы технологического оборудования.

В третьей главе диссертации «Разработка и обоснование способов сокращения ущерба от недоотпуска электроэнергии животноводческим предприятиям с учётом вероятностной модели ущерба» проиллюстрированы разработанные способы сезонного резервирования электроснабжения. Схема, иллюстрирующая разработанный способ (патент №2828477 РФ), показана на рисунке 6, а алгоритм его реализации – на рисунке 7.

Суть способа сводится к следующему. Контролируется, с помощью микроконтроллерного блока автоматического ввода резерва (АВР) и блока управления сезонным резервированием (БУСР), напряжение, подаваемое от основного (ОИЭ) и резервного (РИЭ) источников электроснабжения. АВР запускает РИЭ. В

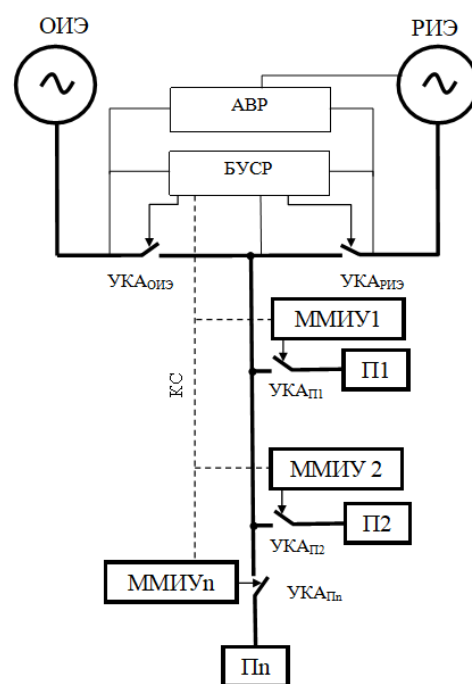


Рисунок 6 – Схема реализации способа сезонного резервирования

качестве ОИЭ выступает, как правило, электрическая сеть 10 кВ и трансформаторная подстанция (ТП) 10/0,4 кВ. В качестве РИЭ выступает ДГУ. При отключении ОИЭ БУСР фиксирует время (час и месяц) возникновения отключения. Согласно заложенному в БУСР алгоритму определяется состав необходимого к резервированию в данное время оборудования (приоритетность задаётся заблаговременно и вносится в БУСР). Потребители, или конкретное оборудование, группы оборудования (П1-Пn) подключаются к сети через модули мониторинга и управления (ММИУ1-ММИУn), которые получают сигнал на включение, или отключение питания потребителей (замыкание, размыкание управляемых коммутационных аппаратов (УКА_{П1}-УКА_{Пn})) от БУСР (при этом ММИУ не осуществляют непосредственное управление оборудованием, а просто обеспечивают его подключение к сети, или невозможность такого подключения. Управление же оборудованием выполняется оператором, или средствами автоматики). Питание переключается на РИЭ, но сигнал на включение оборудования (П1-Пn) получают только те из ММИУ, которые подключают к питанию оборудование, необходимое к резервированию в этот момент оборудование.

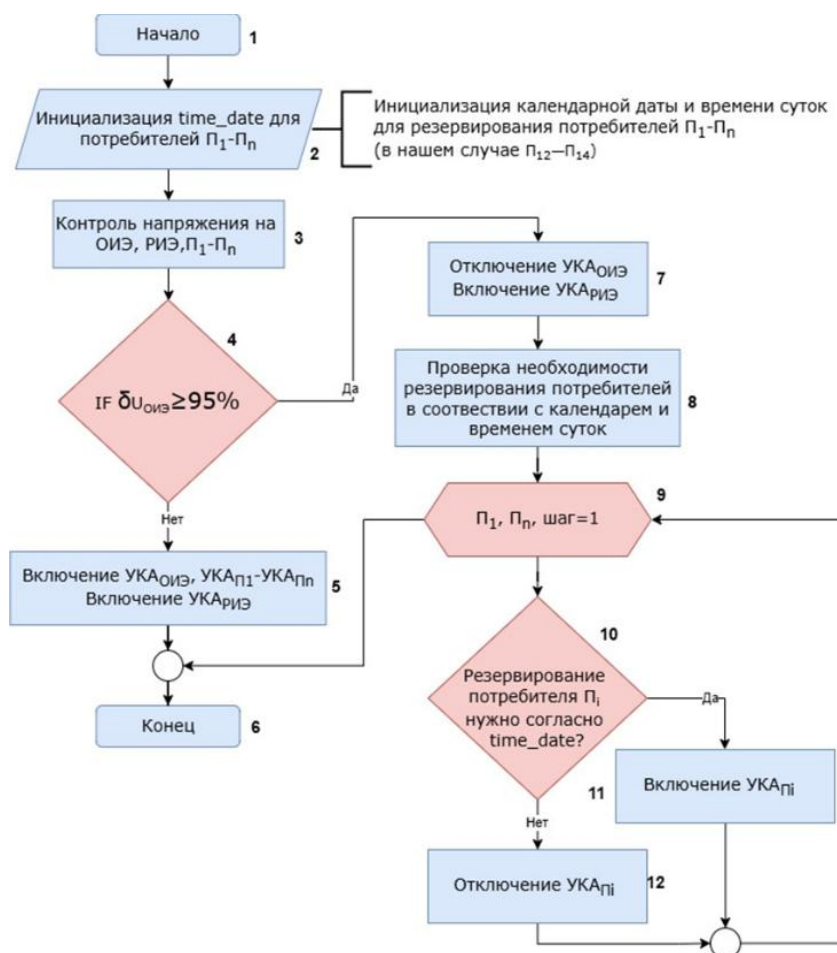


Рисунок 7 – Блок-схема и алгоритм реализации способа сезонного резервирования электроснабжения

оборудования, которое надо резервировать в это время. Далее осуществляется мониторинг, при необходимости осуществляется изменение состава подключенного оборудования, если за время отключения ОИЭ график технологического процесса требует этого. При восстановлении напряжения от ОИЭ, БУСР производит переключение питания всех потребителей на него. При этом все ММИУ получают команду на подключение оборудования П1-Пп к сети.

Разработан также способ сезонного резервирования электроснабжения потребителей с контролем нагрузки (патент №2851812 РФ), отличие которого от указанного выше заключается в том, что при перегрузке РИЭ часть оборудования отключается. Приоритетность отключения также задаётся заблаговременно и вносится в БУСР.

Рассчитана частота отключений (рисунок 8) для каждого часа года рассматриваемого объекта с учётом представленных в главе 2 методики и регрессионной модели.

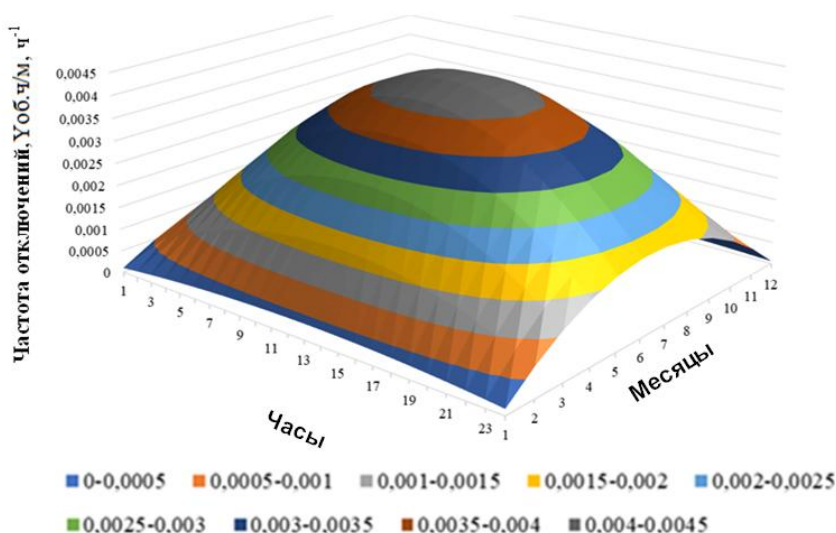


Рисунок 8 – Частота отключений в заданный час заданного месяца в питающей сети предприятия КРС

Суммарный вероятный расход топлива, $R_{ДГУ}$, л, предложено определять по формуле:

$$R_{ДГУ} = Y_{об.м/ч} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{Ti} \cdot T_i \cdot r_{iДГУ}, \quad (10)$$

где P_{Ti} – потребляемая мощность, согласно графику нагрузки в течение i -го времени одинаковой нагрузки при отключении, кВт; T_i – i -е время одинаковой нагрузки при отключении, ч; $r_{iДГУ}$ – удельный расход топлива ДГУ, л/кВт·ч при разной загрузке.

На рисунке 9 показан график потребления топлива ДГУ, выбранными при разных схемах резервирования.

Суммарный вероятный расход топлива при расчётной частоте отключений и мощности ДГУ при традиционной схеме резервирования

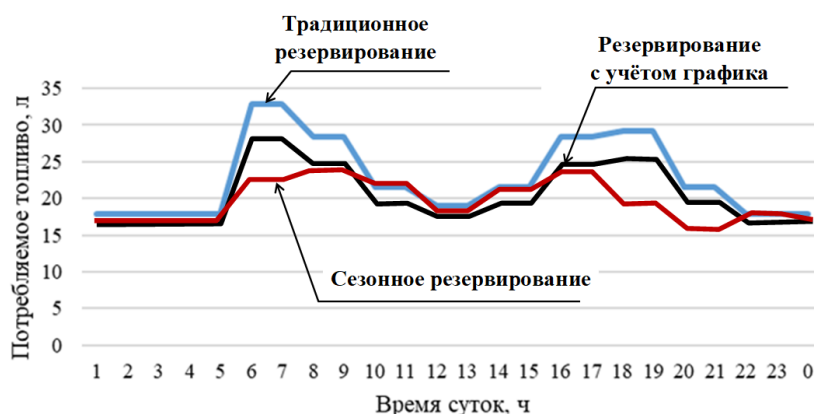


Рисунок 9 – Частота отключений в заданный час заданного месяца в питающей сети предприятия КРС

составляет 73,4 л/год, для резервирования с учётом графика нагрузки – 72,5 л/год, а для сезонного резервирования – 64,8 л/год.

В четвёртой главе диссертации «Разработка технических средств реализации способов сезонного резервирования» разработан показанный на рисунке 10 программно-аппаратный комплекс сезонного резервирования (ПАК СР), реализующий указанные выше авторские способы, а также разработан испытательный стенд и проведены лабораторные испытания ПАК СР (рисунок 11). ПАК СР состоит из БУСР и комплекта ММИУ, соединённых с БУСР проводным соединением, или по каналу

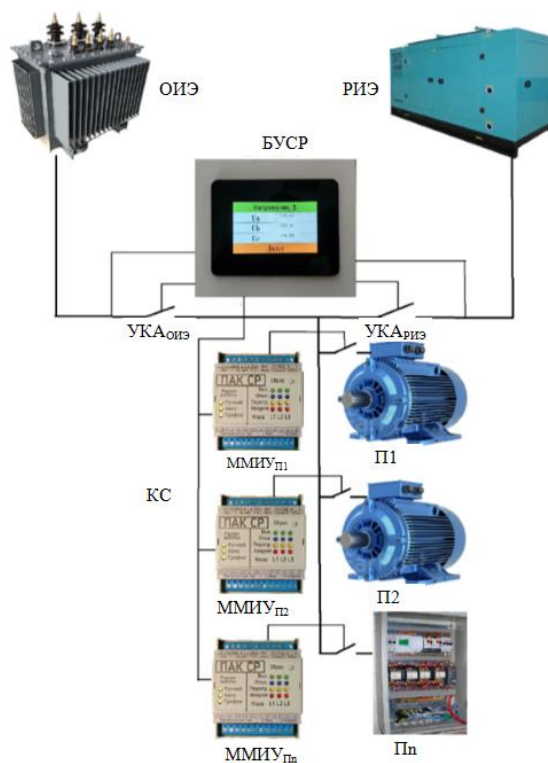


Рисунок 10 – Структурная схема реализации способа сезонного резервирования оборудования фермы КРС с ПАК СР

связи, например, WiFi, радиоканал, или LoRa Wan. В экспериментальном устройстве имеется три модуля ММИУ, соединяемых с БУСР по проводам. На

панели БУСР выводится информация о состоянии питающей сети и происходит настройка параметров работы ПАК СР. В настройках задаётся: время, в которое должно подаваться питание на конкретное оборудование (фактически – в которое необходимо подать сигнал на включение конкретного ММИУ при переходе на РИЭ); уставка по мощности, при превышении которой устройство отключает конкретные ММИУ;

приоритетность отключений ММИУ. Также на лицевой панели ММИУ отображается индикация аварийных ситуаций в цепи питания оборудования с указанием повреждённой фазы.

ММИУ предусматривает три режима работы: ручное управление оператором, автоматическое управление и работу по заданному графику. Лабораторные испытания подтвердили выполнение всех заданных функций и работоспособность комплекса.

В пятой главе диссертации «Технико-экономическое обоснование применения разработанного программно-аппаратного комплекса для реализации способов сезонного резервирования электроснабжения животноводческих предприятий КРС» определены вложения в ПАК СР для рассматриваемого предприятия, которые составляют 64162 руб. при укомплектовании ПАК СР шестью ММИУ. Проведена оценка и сравнение капитальных вложений и эксплуатационных издержек для резервирования по расчётной мощности, резервирования с учётом графика нагрузки и сезонного резервирования с применением ПАК СР. Отдельно оценивались потребление топлива и затраты на

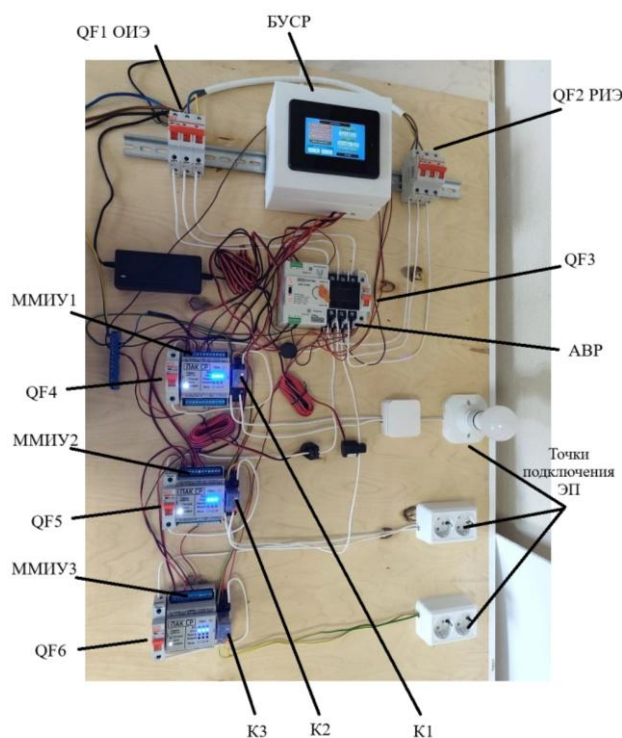


Рисунок 11 – Фото экспериментального образца ПАК СР на стенде

его приобретение. Расчёты проведены для 72 часов работы ДГУ в год. Результаты сравнения показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение технико-экономических показателей

Показатель	Традиционная схема	Резервирование по графику	Сезонное резервирование
Мощность ДГУ, кВА	394	312,5	225
Капитальные вложения, руб.	5 469 255	3 050 646,74	3 021 662,74
Годовой расход топлива, л	164 160	153 363,59	147 387,59
Годовые расходы на приобретение топлива, руб.	1641,6	1533,6	1473,84
Экономия капитальных затрат, руб.	-	2 418 608,26	2 447 592,26
Экономия эксплуатационных затрат, руб./год	-	10 796,41	16 772,41

Таким образом, применение ПАК СР окупится при реализации резервного электроснабжения уже на этапе покупки резервной электростанции и дополнительно будет приносить экономический эффект от 11 до 16 тыс. руб. в год, или от 152 до 222 руб. за каждый час использования ДГУ за счёт экономии топлива.

Дополнительно определены эффекты от применения ДГУ с ПАК СР за счёт сокращения ущербов для животноводческого предприятия. Применение ДГУ с ПАК СР позволяет предотвратить снижение удоя на 30 108,1 кг/год (на сумму 602 162 руб./год), потерю мяса на 140,1 кг. (на сумму 72 852 руб./год) и недоотпуск электроэнергии на 3955,68 кВт·ч (на сумму 27 689,76 руб./год) при суммарном годовом времени отключений, равном 72 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложено решение научной задачи рационализации мощности резервного источника электроснабжения животноводческого предприятия КРС, сокращения энергозатрат при его использовании посредством разработки программно-аппаратного комплекса сезонного резервирования.

Основными результатами теоретических и практических экспериментальных исследований являются:

1. Отключения электроэнергии приводят к ущербам для животноводческих предприятий, значение которых зависит от совпадения момента отключения с графиком технологического процесса. Определяющими с точки зрения надёжности электроснабжения предприятий являются электрические сети 10 кВ. Исследование показателей их надёжности в условиях ДРСК показало, что поток отказов составляет $4,61 \text{ год}^{-1}$, среднее время восстановления электроснабжения – 4,88 ч, а отключения и ущербы от них носят сезонный характер по месяцам года и времени суток с максимумом в летние месяцы в дневные часы. Традиционные способы организации группового резервирования предприятий с применением ДГУ приводят к завышению мощности резервного источника электроснабжения и не учитывают сезонность отключений и сезонности технологического процесса предприятия.
2. Полученная регрессионная модель количества отключений в зависимости от месяца года и времени суток в электрических сетях 10 кВ на примере ДРСК позволила получить зависимости числа отказов в заданные месяц и час возникновения отключения, а методика определения вероятного ущерба животноводческих предприятий КРС от недоотпуска электроэнергии с учётом сезонности дала возможность оценивать вероятный ущерб для конкретных характеристик системы электроснабжения и предприятий. Для рассмотренного примера предприятия КРС, содержащего молочную ферму и телятник вероятный ущерб от отключений в течение года составляет 123165,5 руб. Снизить ущербы возможно применением принципов сезонного резервирования. На примере рассмотренного предприятия мощность ДГУ таким образом можно снизить с 394 до 225 кВА.
3. Разработанные способы и алгоритмы сезонного резервирования предполагают включение на резервное питание только того оборудования предприятия, которое необходимо резервировать в конкретное время, когда произошло отключение электроэнергии, с учётом приоритета для технологического процесса. Это позволяет снизить необходимую мощность

резервного источника, энергозатраты во время его эксплуатации при обеспечении надёжности электроснабжения животноводческих предприятий КРС.

4. Разработанный программно-аппаратный комплекс сезонного резервирования (ПАК СР) электроснабжения животноводческих предприятий КРС содержит блок управления сезонным резервированием и связанные с ним модули мониторинга и управления, что позволяет реализовать адресное резервирование электрооборудования в зависимости от момента возникновения перерыва в электроснабжении и достигать, таким образом экономии потребляемого топлива на 11% в рассматриваемом примере.
5. Капитальные вложения на ПАК СР для рассматриваемого примера предприятия составляют 64 тыс. руб. При использовании ПАК СР мощность ДГУ для рассмотренного предприятия снижается с 394 кВА до 225 кВА. Применение ПАК СР окупится уже на этапе покупки резервной электростанции и дополнительно будет приносить экономический эффект от 11 до 16 тыс. руб. в год, или от 152 до 222 руб. за каждый час использования ДГУ за счёт экономии топлива.

Рекомендации и предложения производству

Полученные в ходе исследования результаты рекомендуется использовать в животноводческих предприятиях для организации рационального резервного электроснабжения, в том числе с применением ДГУ.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективной дальнейших исследований является совершенствование способов сезонного резервирования и программно-аппаратных комплексов их реализации, адаптация и апробация разработанных комплексов на животноводческих предприятиях не только КРС, но и других видов животных и птицы, а также получение регрессионных моделей, отражающих сезонность отключений электроэнергии и ущербов от них для разных регионов страны.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

- основные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности:

1. Виноградов, А. В. Алгоритм управления резервным электроснабжением на основе сезонной приоритизации потребителей и контроля нагрузки / А. В. Виноградов, В. Е. Большев, **А. Г. Ван** // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 8(338). – С. 40-43. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-8-40-43. – EDN HFHPQF.

2. Виноградов, А. В. Система базовых показателей надежности электрических сетей для анализа журналов отключений / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. Г. Ван** // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2025. – Т. 72, № 4. – С. 30-40. – DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-4-30-40. – EDN UXPMIO.

3. Виноградов, А. В. Сезонное резервирование электроснабжения потребителей, подключенных к одной электрической сети / А. В. Виноградов, А. Г. Ван, А. В. Виноградова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2025. – Т. 72, № 1(58). – С. 49-58. – DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-49-58. – EDN VXDDSX.

- патенты РФ:

4. Патент № 2828477 Российская Федерация, МПК H02J 13/00. Способ сезонного резервирования электроснабжения потребителей, подключенных к одной сети / Виноградов А.В., Виноградова А.В., Панфилов А.А., Ван А.Г. // Заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – Заявка 2024109668, заявлено 10.04.2024, опубл. 14.10.2024, Бюл. № 29.

5. Патент № 2851812 C1 Российская Федерация, МПК H02J 9/06, H02J 3/12, H02J 3/46. Способ сезонного резервирования электроснабжения потребителей с контролем нагрузки : заявл. 14.05.2025 : опубл. 01.12.2025 / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, А. Г. Ван, А. А. Панфилов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ". – EDN WNVRQE.

- статьи в журналах РИНЦ:

6. Виноградов, А. В. Особенности технологического процесса животноводческих предприятий КРС с позиции сезонности / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, А. Г. Ван // Агротехника и энергообеспечение. – 2023. – № 3(40). – С. 5-17. – EDN HITKKJ.

7. Ван, А. Г. Анализ существующих требований и направлений повышения надёжности электроснабжения животноводческих предприятий с учётом особенностей и сезонности технологического процесса / А. Г. Ван, А. В. Виноградов, А. В. Виноградова // Агротехника и энергообеспечение. – 2023. – № 4(41). – С. 7-18. – EDN NYSVYG.