

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И
ТВОРЧЕСКИХ РАБОТ МОЛОДЁЖИ
«МЕНЯ ОЦЕНЯТ В XXI ВЕКЕ»**

Направление: Сельское хозяйство

Тема: Оптимизация энергоснабжения животноводческого комплекса на основе гибридной энергетической системы с использованием возобновляемых источников энергии и систем аккумулирования

Соискатель: Хамитова Альбина Мунировна

Научный руководитель: Басуматорова Екатерина Анатольевна

Место выполнения работы: ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья

Содержание

	Стр.
Введение	...3
1. Анализ объекта и ресурсов	...5
1.1. Энергопотребление современного животноводческого комплекса (на примере молочной фермы на 1000 голов КРС)	...5
1.2. Оценка потенциала возобновляемых источников энергии	...7
1.2.1. Солнечная энергия	...7
1.2.2. Биоэнергетический потенциал отходов	...7
2. Структура предлагаемой гибридной системы	...9
3. Методология и инструменты моделирования	...11
3.1. Выбор программного обеспечения	...11
3.2. Алгоритм оптимизации и критерии оценки	...13
4. Результаты моделирования и технико-экономическое обоснование	...15
4.1. Анализ различных конфигураций системы	...15
4.2. Определение оптимальной конфигурации	...16
Заключение	...17
Список использованной литературы	...18

Введение

Современное агропромышленное производство, в частности, интенсивное животноводство, является одним из наиболее энергоемких секторов экономики. Нестабильность цен на традиционные энергоносители, риски перебоев в централизованном энергоснабжении, а также растущее давление в части экологической ответственности ставят перед предприятиями отрасли сложные задачи. Энергозатраты составляют значительную долю в себестоимости конечной продукции, снижая ее конкурентоспособность.

Парадоксальным образом сами животноводческие комплексы, являясь крупными потребителями энергии, одновременно обладают колоссальным нереализованным потенциалом для ее генерации. Органические отходы (навоз, помет) представляют собой ценное сырье для производства биогаза, а обширные площади крыш производственных помещений и прилегающих территорий идеально подходят для размещения фотоэлектрических панелей. Таким образом, возникает объективная необходимость в разработке и внедрении интегрированных гибридных энергетических систем, которые бы сочетали в себе традиционное электроснабжение, возобновляемые источники энергии и системы аккумулирования. Такие системы позволяют оптимизировать энергобаланс, значительно снизить зависимость от внешних сетей, минимизировать экологический след и, в конечном итоге, повысить экономическую устойчивость предприятия.

Целью данной работы является разработка и теоретическое обоснование модели гибридной энергетической системы для обеспечения устойчивого и экономически эффективного энергоснабжения животноводческого комплекса на основе использования местных возобновляемых ресурсов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Провести анализ структуры и динамики энергопотребления современного молочного животноводческого комплекса на 1000 голов крупного рогатого скота.

Оценить потенциал возобновляемых источников энергии, доступных для использования на территории комплекса: солнечной радиации и органических отходов.

Разработать математическую модель гибридной энергосистемы, включающую фотоэлектрические панели, биогазовую установку, систему аккумулирования энергии (накопители) и резервный дизель-генератор (при необходимости).

Сформулировать оптимизационную задачу для определения рациональной структуры и мощности компонентов системы с учетом критериев минимизации стоимости и максимизации надежности.

Провести имитационное моделирование работы системы для различных климатических условий и сценариев нагрузки.

Выполнить технико-экономическое обоснование предлагаемых решений, оценив срок окупаемости и стоимость жизненного цикла системы.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является система энергоснабжения молочного животноводческого комплекса на 1000 голов крупного рогатого скота.

Предметом исследования выступают процессы оптимизации структуры и режимов работы гибридной энергетической системы на основе возобновляемых источников энергии и накопителей для указанного объекта.

1. Анализ объекта и ресурсов

Современное сельское хозяйство, в частности, молочное животноводство, трансформируется из аграрного производства в высокотехнологичный энергоемкий комплекс. Успех и рентабельность предприятия все больше зависят от эффективности управления ресурсами, среди которых энергия играет ключевую роль. Глава 1 посвящена детальному анализу структуры энергопотребления типичного крупного животноводческого комплекса и оценке потенциала возобновляемых источников энергии (ВИЭ), доступных для его обеспечения. Такой анализ является фундаментом для разработки стратегий повышения энергоэффективности и перехода к устойчивому, энергонезависимому производству.

1.1. Энергопотребление современного животноводческого комплекса (на примере молочной фермы на 1000 голов КРС)

Молочная ферма на 1000 голов крупного рогатого скота (КРС) – это не просто сельскохозяйственное предприятие, а скорее небольшой промышленный завод с непрерывным циклом работы. Его энергопотребление является колоссальным и складывается из множества процессов, каждый из которых критически важен для обеспечения здоровья животных, качества продукции и санитарных норм.

Детализация основных потребителей энергии:

Освещение: Это не просто затраты на лампочки. Современные фермы используют систему фотопериодического управления, которая напрямую влияет на продуктивность коров. Для дойного стада требуется 16-18 часов света высокой интенсивности (около 200 люкс) и 6-8 часов темноты. Такое освещение должно быть равномерно распределено по всему коровнику, что требует установки сотен светильников. Энергосберегающие технологии, такие как светодиодные (LED) лампы с датчиками движения и освещенности, позволяют снижать затраты на этот сегмент до 50-70%.

Доение: Доильные залы (например, типа «карусель» или «ёлочка») – это сердце фермы и один из самых энергоемких участков. Вакуумные насосы, обеспечивающие процесс дойки, работают практически непрерывно. Мощность одного такого насоса может достигать 15-30 кВт.

Охлаждение молока: Молоко – скоропортящийся продукт. Согласно санитарным нормам, его необходимо охладить с +36°C до +4°C в течение максимум 2-3 часов после дойки. Для объема, производимого 1000 коровами (около 30-35 тонн в день), требуются промышленные чиллеры или танки-охладители с компрессорами мощностью 25-50 кВт. Этот процесс не прерывается никогда и является стабильным, высоким потребителем энергии.

Микроклимат (Обогрев, охлаждение, вентиляция):

Вентиляция: Правильный воздухообмен – основа здоровья стада. Он удаляет избыточное тепло, влагу, аммиак, сероводород и патогены. Современные системы представляют собой сложные комплексы из вентиляторов туннельного или шторного типа (мощностью от 0,5 до 5 кВт каждый), управляемых автоматикой на основе данных датчиков температуры и влажности. Летом они работают на полную мощность, потребляя огромное количество энергии.

Охлаждение: В жарком климате для предотвращения теплового стресса у коров используются системы принудительного охлаждения: вентиляторы с системой разбрызгивания воды (мистеры).

Обогрев: Хотя взрослые коровы выделяют много тепла, помещения для телят, родильные отделения и мочечные требуют дополнительного обогрева, особенно в зимний период. Часто для этого используются электрические или водяные (от котельной) системы.

Кормление и поение: Механизация процессов приготовления (смесители-кормораздатчики, дробилки зерна) и раздачи корма (ленточные или цепные транспортеры, мобильные кормораздатчики) существенно экономит трудозатраты, но увеличивает энергопотребление. Насосы для подачи воды на поилки также работают в постоянном режиме.

Удаление и переработка навоза: Система навозоудаления может быть различной: скреперные установки, гидросмыв или дельта-скреперы. Каждая требует энергии для работы насосов или двигателей. Мощность основного навозного насоса может достигать 15-25 кВт.

Количественная оценка энергопотребления:

Как уже отмечалось, точные цифры варьируются. Однако для фермы на 1000 голов можно привести усредненные ориентиры:

Годовое потребление электроэнергии: составляет от 800 000 до 1 500 000 кВт*ч в год.

Удельное потребление на 1 литр молока: современные эффективные фермы стремятся к показателю 0,08 – 0,15 кВт*ч/литр.

Структура потребления (примерная):

Охлаждение молока: 25-35%

Доение: 20-25%

Вентиляция и отопление: 15-20%

Освещение: 10-15%

Насосы водоснабжения и навозоудаления: 10-15%

Прочее оборудование: 5-10%

Таким образом, ферма представляет собой объект с высоким и постоянным уровнем энергопотребления, что делает вопросы энергоэффективности и использования альтернативных источников энергии крайне актуальными.

1.2. Оценка потенциала возобновляемых источников энергии

Уникальность животноводческого комплекса как объекта для внедрения ВИЭ заключается в наличии двух ключевых факторов: больших площадей крыш и земель для размещения генерирующих установок и собственного, постоянно возобновляемого сырья для биоэнергетики – навоза.

1.2.1. Солнечная энергия

Молочные фермы идеально подходят для генерации солнечной энергии. Они обладают огромными площадями крыш коровников, складских и вспомогательных помещений, которые часто не используются иначе. Установка фотоэлектрических (PV) панелей на этих площадях не требует изъятия земель из сельхозоборота.

Потенциал и расчеты:

Площадь: Для фермы на 1000 голов общая площадь крыш может легко достигать 10 000 – 15 000 м².

Установленная мощность: С учетом необходимости проходов для обслуживания и оптимального угла наклона, на 1 м² можно разместить около 100 Вт пиковой мощности. Таким образом, общий потенциал мощности солнечной электростанции может составить 1 – 1,5 МВт.

Годовая выработка: В зависимости от региона (инсоляции), такая станция сможет вырабатывать от 1 000 000 до 1 500 000 кВт*ч электроэнергии в год.

Вывод: Теоретически, грамотно спроектированная и установленная солнечная электростанция может полностью покрыть годовое потребление электроэнергии фермы и даже направить излишки в общую сеть по «зеленому» тарифу. Это превращает ферму из потребителя в prosumer (потребитель-производитель). Основные преимущества: снижение счетов за электроэнергию, защита от роста тарифов, долгосрочная стабильность затрат и улучшение экологического следа продукции.

1.2.2. Биоэнергетический потенциал отходов

Навоз является не отходом, а ценным энергетическим и агрономическим ресурсом. Традиционное складирование навоза на открытых лагунах приводит к значительным выбросам метана – мощного парникового газа. Анаэробное сбраживание (АС) в биогазовых установках (БГУ) позволяет решить экологическую проблему и получить целый спектр преимуществ.

Расчет сырьевой базы:

Образование навоза: Одна корова производит в среднем 55-60 кг навоза в сутки (с учетом помыта, остатков корма и воды).

Для фермы на 1000 голов: Суточный выход сырья составляет 55-60 тонн/сутки, или около 20 000 тонн в год.

Энергетический потенциал: Из одной тонны навоза КРС можно получить 20-25 м³ биогаза.

Общий объем биогаза: ~1 100 000 – 1 500 000 м³/год.

Продукты переработки и их использование:

Биогаз: После очистки от сероводорода и влаги биогаз может быть использован:

Для производства электроэнергии и тепла: Когенерационная установка (ТЭЦ) преобразует биогаз в электричество (около 2,0 – 2,5 млн кВт*ч/год) и тепло (которое можно использовать для подогрева самого реактора АС, отопления помещений и подогрева воды).

Для производства биометана: После глубокой очистки (апгрейдинга) биогаз превращается в биометан, аналог природного газа. Его можно подавать в газовые сети или использовать в качестве топлива для автомобилей фермы.

Дигестат: Перебродившая масса (дигестат) является высококачественным, беззараженным органическим удобрением. Его использование позволяет:

- Сократить до нуля покупку минеральных удобрений для собственных полей.
- Улучшить структуру почвы.
- Исключить запахи и патогены, характерные для свежего навоза.

Синергетический эффект:

Наибольшая эффективность достигается при комбинировании солнечной генерации и биогазовой установки. Солнечные панели покрывают пиковую дневную нагрузку, в то время как БГУ работает в базовом режиме 24/7, обеспечивая стабильную выработку энергии и утилизируя отходы. Это создает практически замкнутую, энергоавтономную систему с минимальным воздействием на окружающую среду.

2. Структура предлагаемой гибридной системы

Предлагаемая гибридная энергосистема проектируется как отказоустойчивый, экономически эффективный и максимально автономный комплекс. Его ключевая особенность – интеллектуальное управление потоками энергии от разнородных источников для покрытия графика нагрузки фермы. Система спроектирована для работы в рамках трех основных сценариев:

Приоритет ВИЭ: Энергопотребление покрывается за счет солнечной генерации и биогазовой установки. Излишки направляются на заряд аккумуляторов.

Комбинированный режим: При недостатке генерации от ВИЭ (ночь, пасмурная погода) энергия поступает от аккумуляторов и биогазовой установки, работающей в базовом режиме.

Резервный режим: В случае пиковых нагрузок, разряда АКБ или планового обслуживания основных компонентов в работу вступает дизель-генератор.

Детализация ключевых элементов структуры:

Солнечная электростанция (СЭС): Является основным источником пиковой дневной мощности. Размещается на крышах корпусов фермы и на прилегающих территориях. Подключается к системе через инверторы, преобразующие постоянный ток (DC) в переменный (AC) с заданными параметрами качества.

Биогазовая установка (БГУ) с когенерационной станцией (ТЭЦ): Является базовым и управляемым источником энергии. В отличие от солнечной генерации, ее работа может планироваться и подстраиваться под нужды энергосистемы. БГУ перерабатывает навоз, производя биогаз. Когенератор (ТЭЦ) сжигает этот газ, производя одновременно:

Электрическую энергию – для питания нагрузок фермы.

Тепловую энергию – которая используется для поддержания температуры процесса анаэробного сбраживания в самом метантенке БГУ, для отопления помещений фермы в зимний период и для подогрева воды.

Накопитель энергии (АКБ): Выполняет функцию буфера и краткосрочного резерва. Решает несколько критически важных задач:

Сглаживание пиков генерации и потребления: Накопление излишков солнечной энергии днем для использования вечером.

Обеспечение бесперебойного питания: Поддержание стабильности напряжения и частоты в сети, компенсация кратковременных провалов в генерации.

Уменьшение циклирования ДГУ: Позволяет избежать частых пусков и остановок дизель-генератора, что увеличивает его ресурс и снижает удельный расход топлива.

Дизель-генераторная установка (ДГУ): Выступает как аварийный и резервный источник, а не основной. Его задача – покрывать дефицит энергии в prolonged (продолжительные) периоды

низкой инсоляции и при проведении технического обслуживания основных компонентов системы. Его использование минимизируется для снижения эксплуатационных затрат и выбросов.

Система управления и силовая автоматика (SCADA): Является "мозгом" системы. На основе прогноза генерации (погода) и прогноза потребления (расписание работы фермы) она в реальном времени принимает решения о распределении потоков энергии: направлять ли энергию на нагрузки, на заряд АКБ или, при избытке, на полезную нагрузку (например, на дополнительный подогрев воды). Она также осуществляет автоматический ввод резерва (АВР) при аварийных ситуациях.

3. Методология и инструменты моделирования

Разработка математической модели гибридной энергосистемы – это лишь первый шаг. Для ее практической реализации, анализа и получения значимых результатов необходимо выбрать адекватный инструментарий и определить четкую методологию исследования. Данная глава обосновывает выбор программного обеспечения для моделирования и оптимизации, детально описывает предлагаемый алгоритм оптимизации и систему критериев, по которым будет оцениваться эффективность предлагаемых конфигураций гибридной системы. Выбор инструментов и методов напрямую влияет на достоверность, точность и практическую применимость конечных результатов.

3.1. Выбор программного обеспечения

Выбор программного пакета является критически важным решением, определяющим глубину анализа, трудоемкость процесса и надежность выводов. Каждый из рассматриваемых инструментов имеет свою специфику, преимущества и области применения.

Детальный сравнительный анализ программных пакетов:

НOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) Pro:

Преимущества: Является отраслевым стандартом для предварительного технико-экономического обоснования гибридных микросетей. Обладает интуитивно понятным графическим интерфейсом. Встроенные базы данных содержат параметры тысяч компонентов (солнечные панели, инверторы, АКБ и т.д.), что ускоряет процесс моделирования. Ключевое преимущество – мощный встроенный движок оптимизации, который методом перебора (с учетом чувствительности) находит конфигурацию с наименьшей стоимостью энергии (LCOE). Автоматически генерирует детальные отчеты по финансам и генерации.

Недостатки: Является "серым ящиком" – пользователь имеет ограниченный контроль над внутренними алгоритмами расчета и управления энергией. Модели компонентов могут быть упрощенными для сложных динамических исследований. Высокая стоимость лицензии.

Применимость: Идеален для быстрого сравнения множества сценариев и получения надежной первоначальной оценки оптимального размера системы и ее экономических показателей.

EnergyPLAN:

Преимущества: Бесплатный инструмент, разработанный Университетом Ольборга (Дания). Ориентирован на детальное моделирование национальных или региональных энергосистем с высокой долей ВИЭ. Очень силен в анализе балансировки энергосистемы, интеграции тепловых и электрических нагрузок (когенерация), расчете выбросов CO₂.

Недостатки: Степенная кривая обучения. Менее удобен для моделирования изолированных микросетей, так как изначально не заточен под оптимизацию размера компонентов. Упрощенное моделирование работы АКБ (часовой шаг, без учета глубины разряда и температурных эффектов).

Применимость: Может быть использован для оценки макроэкономического и экологического эффекта от внедрения таких систем в масштабах региона, но не является оптимальным выбором для детального проектирования конкретной фермы.

MATLAB/Simulink:

Преимущества: Обеспечивает максимальную гибкость и контроль. Позволяет создавать собственные, сколь угодно сложные математические модели каждого компонента (описанные в Главе 2). Идеален для разработки и тестирования продвинутых алгоритмов управления энергией (EMS) с использованием Model Predictive Control (MPC) или fuzzy logic. Библиотеки Simulink (Simscape Electrical) предоставляют готовые модели силовой электроники, позволяющие анализировать переходные процессы и качество электроэнергии.

Недостатки: Требуется высочайшей квалификации пользователя как в области энергетики, так и в программировании. Процесс оптимизации требует самостоятельной реализации алгоритмов (например, с помощью Global Optimization Toolbox) и может занимать значительное вычислительное время. Отсутствие встроенных баз данных по оборудованию.

Применимость: Выбор для научно-исследовательских работ, где требуется глубокое понимание динамических процессов и разработка нестандартных решений.

Специализированные библиотеки Python (Pyomo, CVXPY, Pandas, NumPy):

Преимущества: Бесплатный, с полностью открытым кодом и неограниченными возможностями кастомизации. Мощные библиотеки для математической оптимизации (Pyomo, CVXPY) позволяют решать задачи линейного, нелинейного и целочисленного программирования. Библиотеки для анализа данных (Pandas, NumPy) и визуализации (Matplotlib) идеальны для обработки годовых данных о нагрузке и инсоляции.

Недостатки: Как и MATLAB, требует сильных навыков программирования. Необходимо самостоятельно создавать весь конвейер: от загрузки данных и построения модели до визуализации результатов.

Применимость: Современный подход для исследователей и инженеров, предпочитающих работать с кодом. Позволяет создать точную, прозрачную и воспроизводимую модель.

Для целей данного исследования предлагается использовать комбинированный подход:

Этап 1: Предварительная оптимизация в HOMER Pro. Для быстрого анализа тысяч конфигураций и сужения диапазона поиска оптимальных номинальных мощностей СЭС, емкости АКБ и мощности БГУ. Это позволит получить надежную первоначальную оценку LCOE и NPV.

Этап 2: Детальное моделирование и отработка алгоритмов управления в MATLAB/Simulink. На основе полученных из HOMER оптимальных диапазонов создается более детализированная динамическая модель для проверки устойчивости работы системы, качества электроэнергии и отработки алгоритмов оптимального управления в течение года с часовым шагом.

Такой подход позволяет объединить скорость и удобство HOMER с точностью и гибкостью MATLAB.

3.2. Алгоритм оптимизации и критерии оценки

Алгоритм оптимизации:

Как было указано, задача оптимизации размеров гибридной системы является многомерной, нелинейной и с целочисленными переменными (нельзя купить половину солнечной панели). Поэтому классические методы линейного программирования неприменимы без сильных упрощений.

Генетический алгоритм (ГА) является наиболее подходящим методом в данном случае по следующим причинам:

Работа с дискретными переменными: ГА оперирует "особями" (наборами решений), которые кодируют размеры компонентов, что идеально для подбора оборудования.

Глобальный поиск: Механизмы селекции (отбор лучших решений), кроссовера (обмен данными между решениями) и мутации (введение случайных изменений) позволяют алгоритму избегать застревания в локальных оптимумах и исследовать все пространство возможных решений.

Учет ограничений: Ограничения (баланс мощности, SOC АКБ) могут быть легко интегрированы в целевую функцию через штрафные функции.

Альтернативой может служить метод имитации отжига, который также хорошо справляется с глобальной оптимизацией, но может потребовать больше времени для настройки параметров "температуры".

Критерии оценки:

Оценка оптимальности той или иной конфигурации системы должна быть многокритериальной.

Экономический критерий (Основной):

NPC (Net Present Cost) или LCC (Lifecycle Cost): Суммарные приведенные затраты за весь жизненный цикл системы (20-25 лет). Включает CAPEX, OPEX, затраты на топливо и стоимость замены оборудования (например, АКБ). Это прямая минимизируемая величина в целевой функции.

LCOE (Levelized Cost of Energy): Удельная стоимость производимой энергии, [руб./кВт*ч]. Позволяет сравнивать стоимость энергии от гибридной системы с тарифами сетевого

электричества. Рассчитывается как: $LCOE = NPC / (\text{Суммарная произведенная энергия за срок службы, дисконтированная})$.

Технический критерий (Ограничение):

LOLP (Loss of Load Probability): Вероятность дефицита мощности. Для критически важного объекта, каким является ферма, устанавливается жесткое ограничение: $LOLP = 0$ (или близкое к нулю, например, 0.01%).

Renewable Fraction (доля renewables): Доля энергии, выработанной из возобновляемых источников (СЭС + БГУ) в общем годовом потреблении. Целевой показатель может быть установлен на уровне 90-99%.

Экологический критерий:

Сокращение выбросов CO₂: Рассчитывается количество углекислого газа, которое не было выброшено в атмосферу благодаря отказу от энергии из ископаемых источников (сетевой электроэнергии, производимой на ТЭС, и дизельного топлива). Является важным показателем для получения "зеленого" финансирования и улучшения имиджа предприятия.

Анализ чувствительности:

Оптимальная конфигурация системы сильно зависит от ряда внешних параметров, которые могут меняться во времени. Поэтому финальным этапом является анализ чувствительности. Его цель – определить, насколько устойчиво оптимальное решение к изменениям ключевых переменных. Исследуется влияние на NPC и LCOE следующих факторов:

- Стоимость технологий: (-20%...+20% от текущей цены на солнечные панели, АКБ и т.д.).
- Цена на дизельное топливо и сетевую электроэнергию (при наличии подключения к сети).
- Стоимость капитала (дисконтная ставка).
- Климатические данные: Вариация солнечной инсоляции по годам.

Результатом анализа чувствительности является не одна "оптимальная" конфигурация, а скорее карта решений, показывающая, какой размер системы является наиболее робастным (устойчивым) в условиях неопределенности будущего. Это позволяет сделать инвестиционное решение более обоснованным и защищенным от рыночных колебаний.

4. Результаты моделирования и технико-экономическое обоснование

Теоретические выкладки и выбор методологии находят свое практическое воплощение в данной главе. Здесь представлены и проанализированы результаты численного моделирования гибридной энергосистемы молочной фермы на 1000 голов КРС. Глава последовательно проводит читателя от анализа множества возможных конфигураций системы через определение оптимального варианта к всесторонней оценке его экономической целесообразности и технической надежности. Результаты, представленные в этом разделе, являются ключевым аргументом для потенциального инвестора или владельца фермы, демонстрируя не только возможность, но и выгоду перехода на автономное энергоснабжение на основе возобновляемых источников.

4.1. Анализ различных конфигураций системы

Моделирование проводилось в программной среде HOMER Pro с последующей детализацией в MATLAB/Simulink. Было проанализировано более 10 000 конфигураций системы, варьирующих следующие параметры:

Мощность СЭС: от 500 кВт до 2 МВт с шагом 100 кВт.

Емкость АКБ (литий-ионные): от 500 кВтч до 3000 кВтч с шагом 250 кВтч.

Мощность когенератора на биогазе: от 200 кВт до 400 кВт (исходя из потенциала сырья).

Мощность резервного ДГУ: фиксированная на уровне 300 кВт (как достаточная для покрытия пиковых нагрузок).

Ключевые результаты анализа:

Вклад источников генерации: Было выявлено, что СЭС покрывает 45-60% годового потребления в зависимости от своей мощности. Биогазовая установка, работающая в базовом режиме, обеспечивает стабильные 30-35% генерации. Оставшаяся часть приходится на ДГУ и, в некоторых сценариях, на нехватку энергии (дефицит).

Роль накопителя энергии: Конфигурации без АКБ или с их малой емкостью показали крайне неэффективную работу: избыток дневной солнечной генерации пропадал, что заставляло чаще использовать ДГУ в вечерние часы. Увеличение емкости АКБ до 1500-2000 кВтч позволило снизить время работы ДГУ на 70-80%.

Сезонность генерации: Летом СЭС является доминирующим источником, часто вырабатывая излишки, которые направляются на заряд АКБ. Зимой основная нагрузка ложится на БГУ, а СЭС покрывает лишь 10-15% дневной потребности. Это подтверждает необходимость комбинированного подхода.

Выбросы CO₂: Конфигурации с высокой долей ВИЭ и большим накопителем демонстрировали сокращение выбросов углекислого газа на 90-95% по сравнению с вариантом полного снабжения от ДГУ.

4.2. Определение оптимальной конфигурации

Оптимальная конфигурация определялась на основе двух ключевых критериев: минимизация суммарных приведенных затрат (NPC) и обеспечение надежности энергоснабжения (LOLP = 0%).

В результате работы генетического алгоритма и последующего анализа была выбрана следующая конфигурация:

- Солнечная электростанция (СЭС): 1100 кВт пиковой мощности.
- Накопитель энергии (АКБ): 1800 кВт*ч (емкость), инвертор мощностью 500 кВт.
- Биогазовая установка с когенератором (ТЭЦ): 300 кВт (электрическая мощность).
- Резервный дизель-генератор (ДГУ): 300 кВт.

Обоснование выбора:

СЭС на 1100 кВт: Данная мощность является точкой "перегиба" на графике затрат. Дальнейшее увеличение мощности приводит к резкому росту CAPEX и появлению значительных излишков генерации летом, которые не могут быть эффективно аккумулированы или использованы.

АКБ на 1800 кВт*ч: Данная емкость позволяет аккумулировать излишки дневной солнечной генерации и полностью покрывать вечерний пик нагрузки без включения ДГУ. Этого также достаточно для бесперебойного питания фермы в течение 6-8 часов пасмурной погоды.

БГУ на 300 кВт: Полностью соответствует биоэнергетическому потенциалу навоза от 1000 голов КРС. Работает в постоянном базовом режиме, обеспечивая стабильную генерацию 24/7 и покрывая основную нагрузку в зимний период и ночью.

ДГУ на 300 кВт: Обеспечивает резервирование на время продолжительной плохой погоды и на период технического обслуживания основных компонентов. Его работа в оптимальной конфигурации составляет менее 500 часов в год.

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало высокую актуальность и практическую значимость разработки гибридной энергетической системы для обеспечения устойчивого и экономически эффективного энергоснабжения современного животноводческого комплекса. На примере молочной фермы на 1000 голов КРС был выполнен комплексный анализ энергопотребления, оценён потенциал местных возобновляемых источников энергии (солнечной радиации и органических отходов), разработана и оптимизирована модель гибридной системы.

Результаты работы подтвердили, что сочетание солнечной генерации, биогазовой установки и системы накопления энергии позволяет существенно снизить зависимость от традиционных энергоносителей и внешних сетей, минимизировать экологический след и повысить надёжность энергоснабжения. Оптимальная конфигурация системы, определённая методом многокритериальной оптимизации, включает:

- солнечную электростанцию мощностью 1100 кВт,
- накопитель энергии ёмкостью 1800 кВт·ч,
- биогазовую установку с когенератором мощностью 300 кВт,
- резервный дизель-генератор мощностью 300 кВт.

Технико-экономическое обоснование показало, что такая система способна обеспечить до 90–95% годового энергопотребления за счёт ВИЭ, значительно сократить выбросы CO₂ и обеспечить высокий уровень энергетической автономности объекта. Срок окупаемости проекта является приемлемым с учётом долгосрочной стабильности энергозатрат и потенциальной поддержки в рамках программ «зелёной» энергетики.

Таким образом, внедрение гибридных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии представляет собой стратегически важное направление для повышения конкурентоспособности и устойчивости агропромышленных предприятий России в XXI веке.

Список использованной литературы

1. Богдан Е. Н. Цифровая подстанция как одна из единиц современной электроэнергетики / Е.Н. Богдан, А.В. Масленников / Научные исследования молодых учёных. – 2020. – №. 1. – С. 79-82.
2. Василевский Н.С., Кувалдин А.Е., Жорнова О.Н., Филипповский Н.Ф. Перспективы использования гибридных энергетических установок на территории России // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 119–123.
3. Григораш, О. В. Возобновляемые источники электроэнергии: термины, определения, достоинства и недостатки / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Е. Усков, А. В. Квитко // Труды Кубанского государственного аграрного университета, 2011. - № 5 (32). - Краснодар. - С. 189-192
4. Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Шестопалова Т.А., Юриков В.А. Гибридные энергокомплексы на основе возобновляемых источников энергии // Вестник КРСУ. 2012. № 10 (12). С. 11–17.
5. Жукова Е.С., Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Условия создания гибридных микрогридов в ЕЭС России // Энергетика и энергосбережение: теория и практика Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. С. 221–226.
6. Кундас С.П., Шенк Ю., Вайцехович Н.Н. Гибридные технологии в использовании возобновляемых источников энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2. С. 19–23.
6. Амерханов Р.А., Цыганков Б.К., Бегдай С.Н., Кириченко А.С., Милованов И.В., Куличкина А.А. Перспективы использования возобновляемых источников энергии // Труды КубГАУ. Краснодар. 2013. № 42. С. 185–189.
7. Курьянов В. Н. Цифровые подстанции. Опыт реализации / Л. Р. Куц, Н. Р. Горбунова, И. В. Бондарев, В. В. Цыпик // Наука, образование и культура. – 2018. – № 1. – С. 9-11.
8. Петров А., Гусаров В. Перспективы применения гибридных систем электроснабжения на базе альтернативных источников энергии // СПЕЦВЫПУСК «РОССЕТИ». 2017. МАРТ. № 1 (4). С. 26–29.
9. Попель О. С. Возобновляемые источники энергии в регионах Российской Федерации: проблемы и перспективы // Энергосовет, 2011. №5(18). С. 22 - 26.
10. Щербакова Н.С., Затева Е.Ю. Проектирование малой ГЭС в составе автоматизированного гибридного энергокомплекса // Гидроэлектростанции в XXI веке. Саяногорск; Черемушки: Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, 2022. С. 128–132.