

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Жидков Алексей Александрович

**Развитие принципов применения распределенной малой генерации на
свалочном газе**

2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре «Системы электроснабжения предприятий»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Павлюченко Дмитрий Анатольевич

Официальные оппоненты:

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»;

Суслов Константин Витальевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»;

Велькин Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии».

Защита состоится 29 ноября 2022 года в 11 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.10.26 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=3854>

Автореферат разослан: « » октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из перспективных способов сокращения негативного влияния твердых коммунальных отходов (ТКО) на экологию является использование систем дегазации полигонов ТКО с дальнейшей утилизацией свалочного газа с помощью газопоршневых установок (ГПУ). Подробный механизм поддержки государством таких объектов вступил в силу в 2015г. (ПП РФ N 47), а основной принцип механизма поддержки таких объектов заложен в Федеральном законе N 35-ФЗ, где зафиксирована норма об обязательной покупке сетевыми компаниями в приоритетном порядке электрической энергии, выработанной такими генерирующими объектами, в целях компенсации потерь в сетях. При этом использованию электростанций на свалочном газе как элемента распределенной генерации (РГ) препятствуют некоторые факторы, свойственные для РГ, подключаемой к развитой электрической сети. Это привело к тому, что в период с 2015 г. и на настоящий момент в нашей стране не введено ни одного такого объекта.

Большинство таких негативных факторов можно устранить традиционными решениями, однако, обеспечение динамической устойчивости традиционно обеспечивается в основном только за счет отключения генераторов. Но данное решение может быть работоспособно только до определенного момента: как только объем РГ станет существенным и будет оказывать влияние на суммарный баланс, данное решение станет недопустимым, т.к. разовое отключение большого объема РГ приведет к нарушению баланса электрической мощности.

Степень разработанности темы. В настоящее время выполнено значительное количество исследований, посвященных обеспечению динамической устойчивости РГ. Эти работы в первую очередь направлены на рассмотрение способов обеспечения динамической устойчивости объектов РГ, основанных на отделении от энергосистемы генераторов малой мощности со сбалансированной нагрузкой – то есть переход в так называемый «островной» режим. Недостатком данного метода является высокое количество коммутаций (иногда по несколько коммутаций в течение суток) и необходимость развитой интеллектуальной распределенной системы управления, для которой необходимы постоянные корректировки настроек при изменении параметров и конфигурации сети. При этом стоимость создания и эксплуатации такой системы управления в некоторых случаях может существенно превышать стоимость самого генерирующего оборудования.

В области научно-исследовательских работ тема РГ располагается на одном из лидирующих мест в стране. Данным вопросом занимаются такие ученые как Илюшин П.В., Фишов А.Г., Суслов К.В., Соснина Е.Н, а также многие другие. Активное изучение электромагнитной трансмиссии (ЭТ) отечественными

учеными началось еще в 1960-х гг научной группой под руководством Л.Б. Ганзбурга. Также значительный вклад в изучение ЭТ внесли Е.Д. Рейфе и В.Л. Вейц. Кроме того, стоит отметить, что в настоящее время такими учеными как Андреюк В.А., Ачитаев А.А., Якоб П. Ахо, Л. Гордон Крафт проведены исследования по управлению мощностью турбоагрегатов с использованием такого режимного параметра, как абсолютный угол векторов ЭДС эквивалентных генераторов и изыскания по управлению ветровой турбиной без вставки постоянного тока путем использования ЭТ. Однако работы, сочетающие эти факторы по использованию ЭТ для обеспечения динамической устойчивости традиционной генерации, отсутствуют. Также практически не ведется научных разработок по использованию свалочного газа для выработки электрической энергии.

Таким образом, на настоящий момент выполнено множество исследований по обеспечению устойчивой работы РГ без ЭТ и использованию ЭТ для обеспечения параллельной работы с сетью ветроэнергетических установок (ВЭУ), однако отсутствуют работы, связанные с использованием ЭТ для обеспечения динамической устойчивости турбогенераторов, работающих на традиционном топливе.

Цель работы состоит в исследовании потенциала использования в мегаполисах распределенной малой генерации на свалочном газе и их влияния на режимы электрических сетей.

Поставленная в диссертационном исследовании цель достигается решением следующих **задач**:

1. провести анализ возможности и исследование потенциала использования в электрических сетях мегаполисов объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии;
2. выполнить исследование и разработать модель оценки влияния качества газа на параметры выдачи мощности объектов генерации на свалочном газе;
3. выполнить исследование и разработать модель оценки эффективности применения электромагнитного вариатора для обеспечения динамической устойчивости объектов генерации на свалочном газе при их работе в составе электроэнергетической системы;
4. выполнить исследование режимов распределительных электрических сетей мегаполиса при наличии в них объекта генерации на свалочном газе, а также технико-экономическую оценку вариантов его подключения к электрической сети.
5. оценить потенциал использования объектов генерации на свалочном газе для повышения энергоэффективности за счет снижения потерь электрической

энергии и выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети.

Объект исследования – распределительные электрические сети мегаполиса с распределенной малой генерацией на свалочном газе.

Предмет исследования – влияние объектов распределенной малой генерации на свалочном газе на режимы электрических сетей мегаполисов.

Методология и методы исследования. Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых в области установившихся и переходных режимов работы электроэнергетических систем с элементами распределенной генерации, возобновляемых источников энергии и электромагнитной трансмиссией.

В работе использовались методы математического моделирования установившихся режимов и электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель оценки потенциала объектов распределенной малой генерации на основе возобновляемых источников энергии, в том числе свалочного газа, для единицы поверхности мегаполисов, позволяющая выполнять укрупненный анализ эффективности использования ВИЭ с учетом ограничений по земельным ресурсам и в стесненных условиях.
2. Математическая модель оценки эффективности применения электромагнитного вариатора для обеспечения динамической устойчивости объектов генерации на свалочном газе при их работе в электрических сетях мегаполисов.
3. Имитационная модель электромагнитного вариатора и электрической сети в программно-аппаратном комплексе моделирования энергосистем в реальном времени.
4. Методика исследования режимов распределительных электрических сетей мегаполиса при наличии в них объекта генерации на свалочном газе для технико-экономической оценки различных вариантов его технологического присоединения к электрической сети.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена оригинальная методика, позволяющая определить и обосновать эффективность использования объектов генерации на свалочном газе в мегаполисах с точки зрения рациональности использования земельного ресурса и экологичности.

2. Обоснована эффективность электромагнитного вариатора как средства обеспечения динамической устойчивости применительно к объектам генерации на свалочном газе при их работе в электрических сетях мегаполисов.
3. Выявлена необходимость пересмотра действующих нормативных документов в части изменения значения коэффициента использования установленной мощности для объектов генерации на свалочном газе.
4. Решена комплексная задача по подключению объектов генерации на свалочном газе к электрическим сетям мегаполисов и обоснованию экономической эффективности такого подключения в зависимости от качества используемого газа.
5. Доказано положительное влияние объектов генерации на свалочном газе на энергоэффективность за счет снижения потерь электрической энергии и выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии исследования потенциала использования в мегаполисах объектов распределенной малой генерации на основе возобновляемых источников энергии, в том числе свалочного газа.

Практическая значимость работы. Модель оценки возможного потенциала разных видов ВИЭ с единицы поверхности позволяет выполнить оценку эффективности использования ВИЭ с учетом реальных ограничений по земельным ресурсам и в стесненных условиях.

Методика исследования режимов работы ГПУ на свалочном газе в составе электроэнергетической системы позволяет наиболее точно оценить объем необходимых мероприятий и капитальные затраты для строительства объекта генерации на свалочном газе, а также достоверно оценить экономический и технический эффект от данного строительства.

Полученные в ходе исследования результаты переданы в ООО «ИНПЭС» для апробирования, и на их основе в период 2017-2020 гг. выполнены следующие проекты:

- Научно-исследовательская работа с подготовкой технико-экономического обоснования «Разработка оптимальной схемы энергообеспечения потребителей о.Парамушир до 2030 года с оценкой энергopotенциала острова Парамушир».
- Схема выдачи мощности ГПУ ООО "НОВОСИБВТОРРЕСУРС.
- Информационно-теоретическое исследование в рамках НИОКР «Разработка и апробация инновационных технологий по снижению расхода на собственные нужды подстанций в рамках реализации мероприятий Дорожной карты Национального проекта "Энергоэффективная подстанция". Раздел «Использование возобновляемых источников энергии».

- Предпроектное обследование схемы электроснабжения полигона ТКО "Кучино".

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обоснована верификацией полученных результатов с режимами работы действующей в России электростанции на свалочном газе, корректным использованием средств расчета установившихся режимов, режимов короткого замыкания, переходных процессов в электроэнергетических сетях и системах (программно-вычислительные комплексы RastrWin, Homer Energy, MatLab Simulink, RTDS, АРМ СРЗА).

Апробация результатов работы. Основные результаты и положения работы обсуждались на семинарах кафедры систем электроснабжения предприятий и факультета энергетики НГТУ и докладывались на следующих конференциях:

- VII Международный форум технологического развития «Технопром-2019». Новосибирск, 2019 (Заседание региональной рабочей группы национальной технологической инициативы в сфере энергетики «Энерджинет» актуальная повестка технологического развития электроэнергетики в мире и ее влияние на стратегию развития электроэнергетики российской федерации). Тема доклада: «Специфика использования свалочного газа с полигонов ТКО для генерации и продажи электроэнергии».
- Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг-2020». Сочи, 2020. Тема доклада: «Использование электромагнитного вариатора в составе газопоршневой электростанции для обеспечения динамической устойчивости».
- Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon-2021. Владивосток, 2021.
- Международная конференция 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). Екатеринбург, 2020.
- Международная научная электроэнергетическая конференция "ISCEE – 2021". Санкт Петербург, 2021.
- Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы и исследования надежности больших систем энергетики». Волжский, 2021 г.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 6 научных работ в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 3 научные статьи, индексируемые в базе библиографических данных Scopus.

Личный вклад автора. Рассмотренная в работе проблематика выявлена лично автором в ходе своей профессиональной и научной деятельности. В

работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка методик, моделей и их реализация в программных средствах, а также обобщение и анализ результатов моделирования режимов электрических сетей с объектом генерации на свалочном газе в ее составе.

Структура и объём работы. Диссертационная работа общим объемом 210 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка терминов, библиографического списка из 113 наименований, приложений, содержащих акты внедрения результатов работы, содержит 109 рисунков, 55 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность результатов работы.

В первой главе рассмотрены особенности распределенной генерации, в том числе функционирующей на базе ВИЭ. Выполнена оценка потенциала применения распределенной генерации на ВИЭ в России с детальным анализом для крупнейших мегаполисов страны.

Для проведения количественного анализа потенциала ВИЭ в мегаполисах разработана специальная модель для оценки возможного потенциала разных видов ВИЭ с единицы поверхности. Суть предложенной модели сводится к обязательному учету конструктивных особенностей элементов ВИЭ, которые приняты на основании объектов аналогов.

Рассмотренные в работе примеры по использованию солнечной энергии, энергии ветра, геотермальной энергии и гидроэнергии показали, что использование данных ВИЭ в мегаполисах РФ малоэффективно, т.к. у них существенно снижен показатель производительности на единицу площади. Исключением является только генерация, функционирующая на свалочном газе, которая не использует новых земель, а устанавливается на территории полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО).

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что в мегаполисах наиболее рационально использование генерации на свалочном газе. Именно данный вид генерации, функционирующей на основе ВИЭ, рассматривается в настоящей диссертации более подробно.

Во второй главе приведены особенности и описана технология добычи и использования свалочного газа. Основной особенностью является то, что качество свалочного газа обычно низкое, при этом в нем содержится множество примесей,

которые негативно влияют на энергоустановку, поэтому применение газотурбинных установок (ГТУ) для свалочного газа имеет высокие риски быстрого повреждения и выхода оборудования из строя. ГПУ менее требовательны к качеству топлива, поэтому во всем мире в качестве генерирующего оборудования для свалочных электростанций применяются только ГПУ.

Далее в главе приведен механизм государственной поддержки объектов генерации на свалочном газе. Отмечено, что в связи с разрозненностью информации и необходимостью учета мероприятий в разных сферах промышленности (электроэнергетика, теплоэнергетика, газоснабжение, химическая промышленность, экология) и экономики, процесс строительства генерирующего объекта на свалочном газе получается очень сложным с организационной и технической точки зрения. При этом в настоящее время отсутствует методика такого строительства.

Для упрощения процесса строительства в главе разработана методика реализации проекта строительства генерирующего объекта на свалочном газе с целью продажи электрической энергии на розничном рынке по «зеленому» тарифу.

Также разработана методика оценки зависимости параметров ГПУ от параметров используемого газа и создана укрупненная карта такой зависимости, которая приведена в таблице 1 и может использоваться для предварительной оценки эффективности проекта. В настоящее время отсутствуют готовые решения и методики по оценке зависимости параметров ГПУ от параметров используемого газа, поэтому разработка такой методики является актуальной задачей.

Таблица 1 – Карта зависимости параметров ГПУ от параметров газа

Содержание метана, %	30	40	50	60	95
Установленная мощность, о.е	1	1	1	1	1
Рабочая мощность, о.е	0,428	0,516	0,596	0,676	1
КПД по выдаче электроэнергии, %	38,2	40,5	42,4	44,2	47,3

Кроме того, стоит отметить, что в отношении генерирующих объектов на свалочном газе величина нормативного коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) принята на уровне 0,65. При этом, в соответствии с полученными результатами, для обеспечения такого КИУМ необходимо содержание метана в газе не менее 55-60% и круглосуточная работа генерирующего оборудования без возможности вывода его в ремонт, что технически невозможно. Таким образом, с учетом определенной зависимости выходных параметров генерирующего оборудования от параметров газа, необходим пересмотр действующей нормативной документации. Инициатива

внесения соответствующих изменений в НТД озвучена автором данной работы в рамках Национальной технологической инициативы (НТИ) EnergyNet.

В третьей главе выполнено исследование эффективности применения электромагнитного вариатора (ЭВ) для обеспечения динамической устойчивости электростанции.

ЭВ представляет собой электромеханическую систему с изменяемым выходным вращающим моментом, который формирует добавочный момент для стабилизации скорости на валу генератора. То есть он является двухмассовой электромеханической системой, которая образуется за счет упругой магнитной связи между двигателем и генератором. Вместе с тем, ЭВ выполняет функцию демпфера при переходных процессах.

В целях описания физического принципа влияния дополнительного приведенного угла рассогласования между двигателем и генератором в ЭВ на режимные параметры электроэнергетической системы представлен рисунок 1, на котором для сравнения приведены иллюстрации переходных процессов для традиционной компоновки электростанции и компоновки с ЭВ.

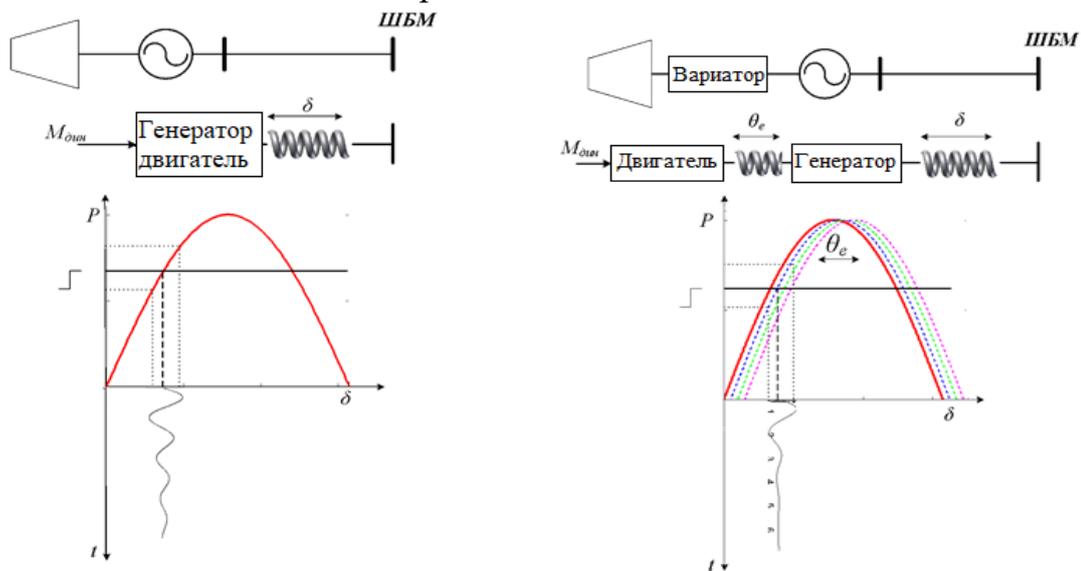


Рисунок 1 – Иллюстрация переходного процесса для ГПУ без ЭВ и с ЭВ

Традиционная система имеет в своем составе только одно колебательное звено, описываемое электрическим углом δ между векторами ЭДС генератора и напряжением шины бесконечной мощности. В компоновке с ЭВ отражено два колебательных звена, следовательно, можно наблюдать влияние дополнительного приведенного угла рассогласования в двухмассовой системе, формирующего жесткость между двигателем и генератором.

Анализ переходных процессов был проведен с помощью программного обеспечения MatLab Simulink® с применением метода расчета нелинейных дифференциальных уравнений с использованием метода Дормана-Принца.

Уравнение упругой магнитной связи можно выразить через максимальную электромагнитную мощность, передаваемую от одного ротора ЭВ к другому:

$$K_{EM} = P_{\max} \sin(\theta_e), \quad (2)$$

где θ_e – приведенный угол рассогласования, град.

Тогда вращательное движение ротора ГПУ, подключённого к шине бесконечно мощности (ШБМ), может быть описано следующим уравнением:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \pm K_{EM} - P_{EM}, \quad (3)$$

где P_{EM} – электромагнитная мощность генератора; δ – угол рассогласования ротора синхронного генератора по отношению к ШБМ; T_J – постоянная времени инерции ротора генератора; K_{EM} – мощность противодействия, создаваемая ЭВ.

А уравнения баланса механической мощности со стороны двигателя:

$$T_{JT} \frac{d^2 \delta'_1}{dt^2} = P_T \pm K_{EM}, \quad (4)$$

где δ'_1 – угол положения ротора, град; T_{JT} – постоянная времени механической инерции двигателя.

Для регулирования скорости ЭВ можно использовать два взаимных звена управления: звено тока (момента) и звено скорости вращения. Управление по звену тока описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - \frac{\omega_e L_d i_d}{L_q} + \frac{u_q - K_e \omega_h}{L_q} \end{cases} \quad (5)$$

где L_d и L_q – индуктивности звена управления в d и q осях; R – активное сопротивление на фазу; K_e – постоянная противо-ЭДС, создаваемая ЭВ; u_d и u_q – напряжения в d и q осях; ω_h – скорость выходного звена; $\omega_e = \omega_h - \omega_0$ – приведенная угловая скорость дополнительного рассогласования.

Управление по звену скорости описывается уравнениями:

$$\begin{cases} T_h \frac{d^2 \delta_h}{dt^2} = P_{em} - P_{\max} \cdot [\sin(\theta_h - \theta_{Load})] - B_h \omega_h' / \omega_{Load} - \mu_{ap} (\omega_h - \omega_{Load}) / \omega_{Load} \\ T \frac{d^2 \delta_0}{dt^2} = P_{\max} \sin(\theta_h - \theta_{Load}) - P_{Turbine} - B_0 \omega_0 / \omega_h' - \mu_{ap} (\omega_h - \omega_{Load}) / \omega_h', \end{cases} \quad (6)$$

где J_h , B_h – момент инерции и вязкое затухание ротора выходного звена; ω_0 , J , B_0 – угловая скорость, суммарный момент инерции входного звена, коэффициент вязкого трения; μ_{ap} – коэффициент затухания.

На рисунке 2 представлена структурная схема ЭВ.

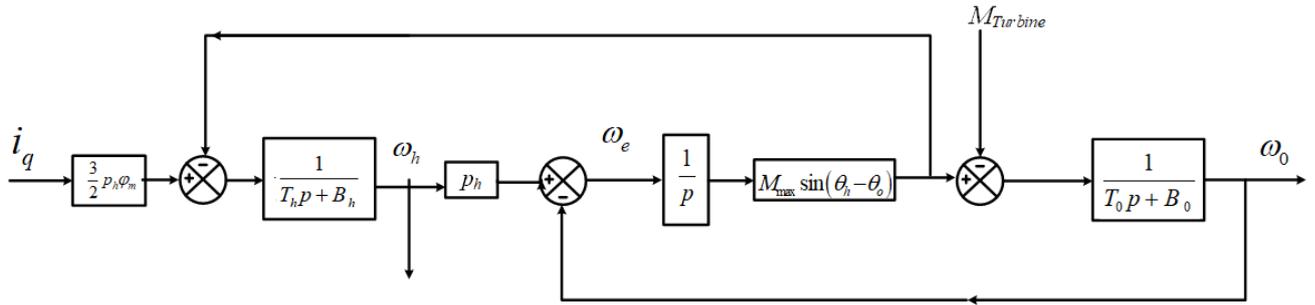


Рисунок 2 – Структурная блок-схема ЭВ для ГПУ

Для оценки эффективности ЭВ анализ переходных процессов выполнялся как для классической компоновки ГПУ, так и для ГПУ с ЭВ в одинаковых режимных условиях работы сети. С целью унификации исследование проводилось в относительных единицах. Структурная схема исследуемой сети приведена на рисунке 3.

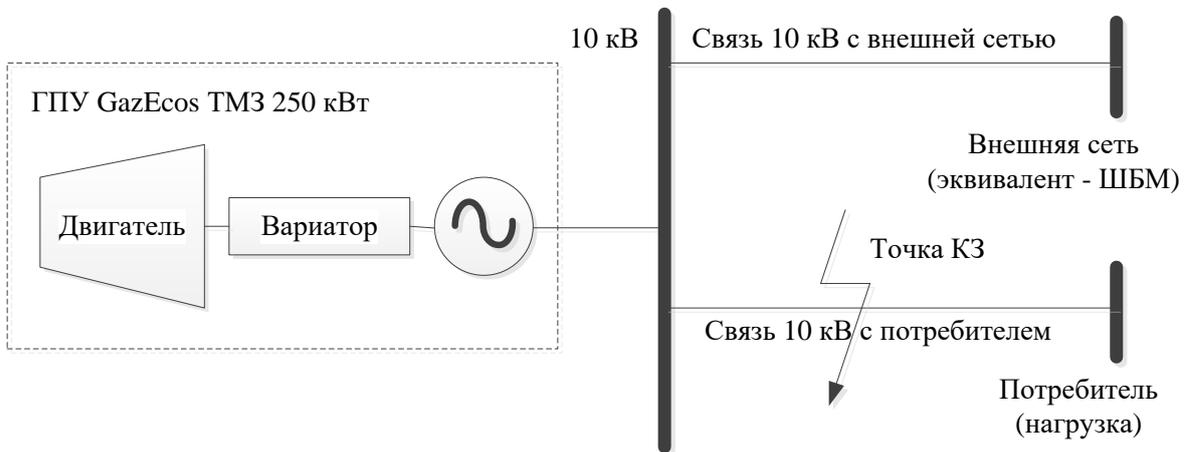


Рисунок 3 – Структурная схема исследуемой сети

На рисунках 4 и 5 изображены осциллограммы скорости вращения и угла ротора ГПУ, токов ГПУ и напряжения на шинах ГПУ без учета и с учетом ЭВ при исследуемом коротком замыкании в сети.

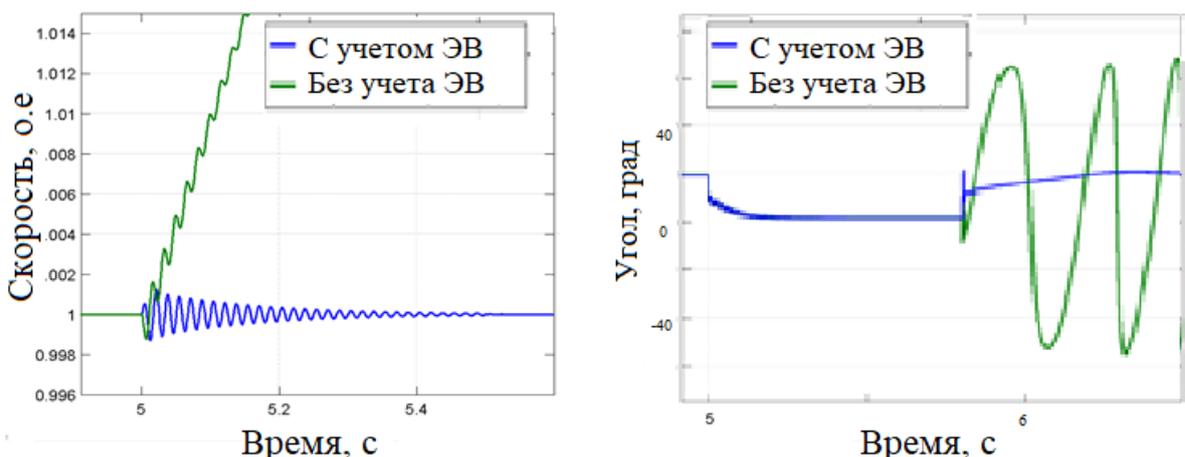


Рисунок 4 – Осциллограммы скорости вращения и угла ротора ГПУ (Без ЭВ / С ЭВ)

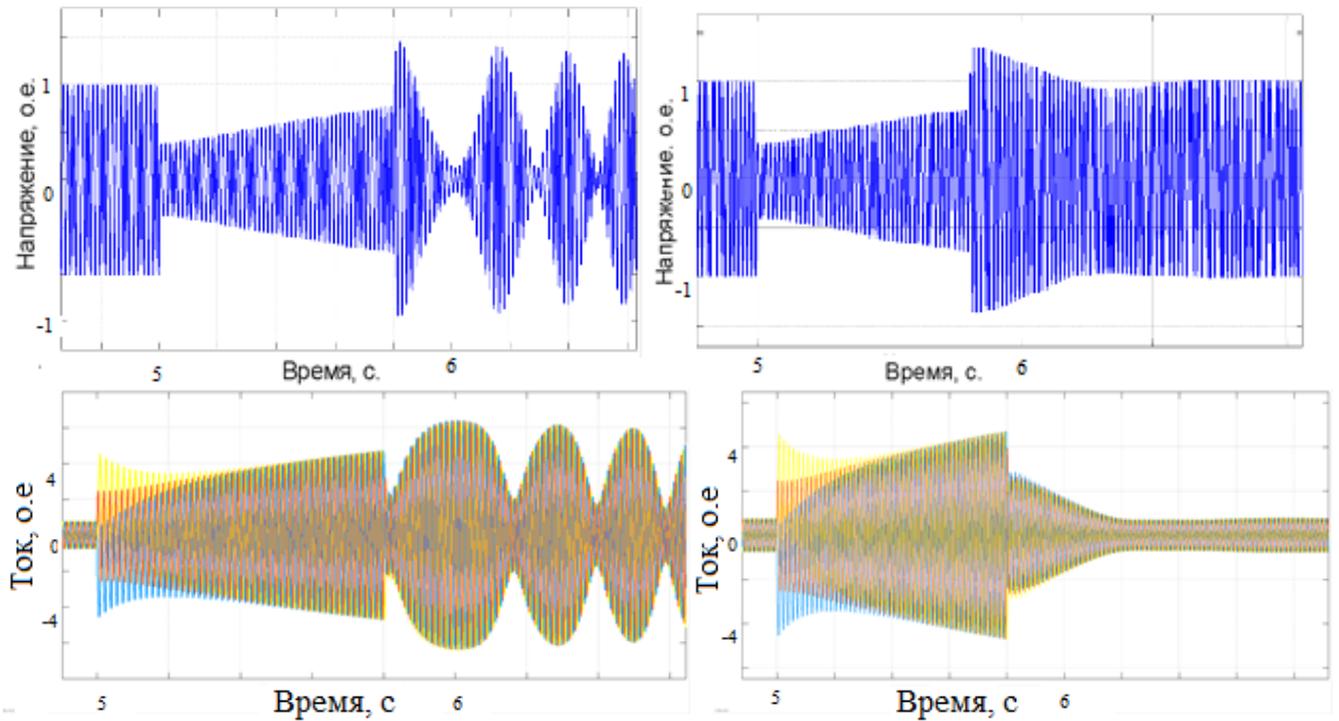


Рисунок 5 – Осциллограммы токов и напряжения на шинах ГПУ (Без ЭВ / С ЭВ)

Для оценки правильности математического моделирования была проведена верификация разработанных алгоритмов на цифровом программно-аппаратном комплексе моделирования энергосистем в реальном времени RTDS (Real Time Digital Simulator) (ПАК RTDS).

С целью верификации полученных результатов, при моделировании в ПАК RTDS принималась сеть, аналогичная рассмотренной ранее. На рисунках 6 и 7 представлены соответственно разработанная модель исследуемой электрической сети и модель ЭВ, принятая для исследования.

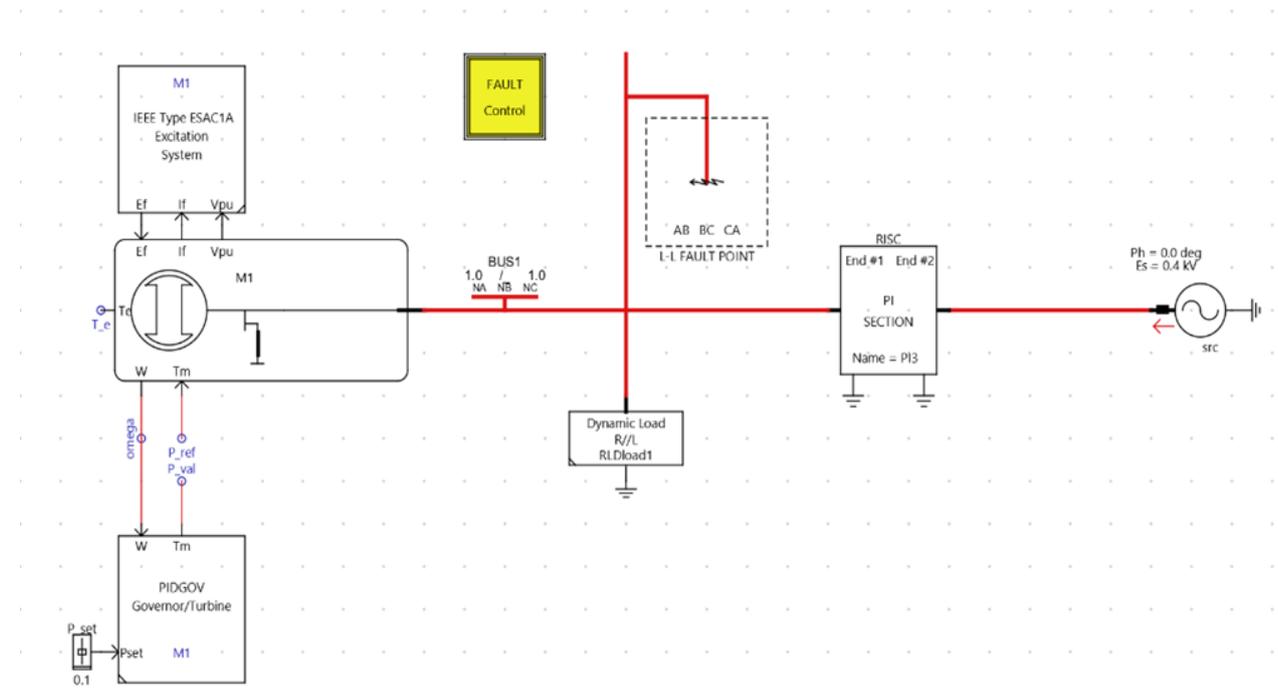


Рисунок 6 – Модель исследуемой электрической сети в ПАК RTDS.

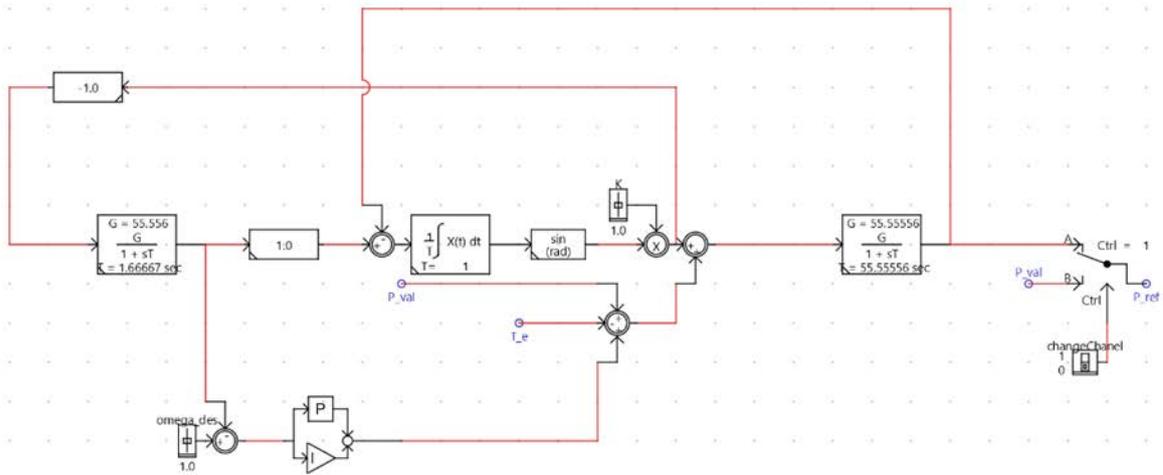
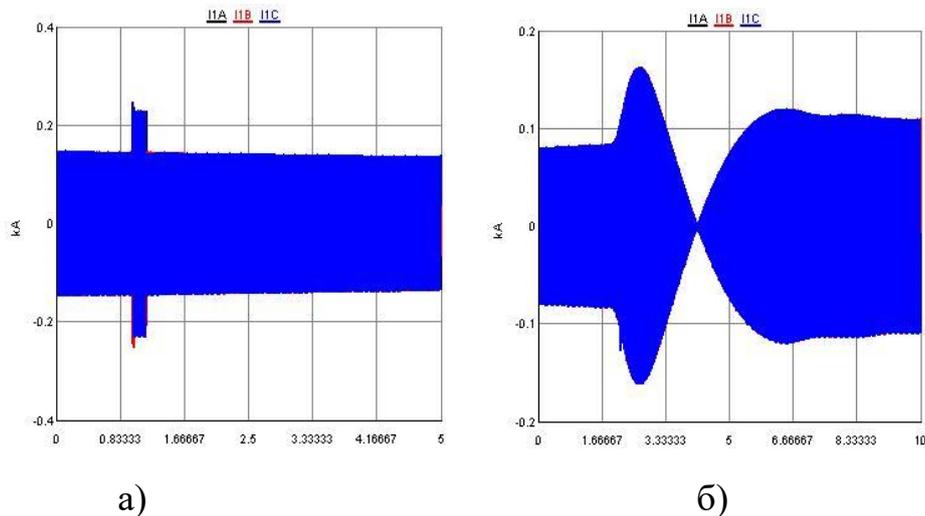


Рисунок 7 – Модель ЭВ ПАР RTDS.

На рисунке 8 представлены результаты исследования переходных процессов с электромагнитной трансмиссией и без нее.

Исследование электромеханической совместимости параллельной работы генераторов в энергосистеме при сильных возмущающих воздействиях с использованием в составе ГПУ ЭВ показало, что за счет использования ЭВ можно обеспечить устойчивость ГПУ при тех возмущениях в электрической сети, для которых без применения ЭВ или других технических мероприятий устойчивость переходного процесса обеспечить невозможно. Таким образом, ЭВ может считаться эффективным техническим мероприятием для обеспечения устойчивости ГПУ при аварийных возмущениях в сети.



а)

б)

Рисунок 8 – Осциллограммы тока статора ГПУ (а – с ЭВ, б - без ЭВ)

В четвертой главе для исследования режимов работы объекта генерации на свалочном газе в составе ЭЭС в качестве примера рассмотрена электростанция установленной мощностью 1,25 МВт в Новосибирской области.

Для выполнения данного исследования разработана отдельная методика, включающая в себя следующие этапы:

- 1 этап. характеристика режима работы электростанции;
- 2 этап. анализ исходной схемы электрической сети;
- 3 этап. разработка вариантов подключения электростанции к электрической сети;
- 4 этап. исследование установившихся режимов;
- 5 этап. исследование режимов короткого замыкания (КЗ);
- 6 этап. технико-экономическое сравнение вариантов подключения электростанции;
- 7 этап. оценка экономически обоснованного тарифа на электрическую энергию и мощность.

В рамках проведенного исследования по предложенной методике были разработаны 2 варианта технологического присоединения к энергосистеме электростанции на свалочном газе, которые приведены на рисунке 9.

Далее для рассматриваемых вариантов были проведены исследования установившихся электроэнергетических режимов, режимов КЗ и технико-экономическое сравнение вариантов. По результатам исследования для предложенных вариантов определен перечень требуемых мероприятий.

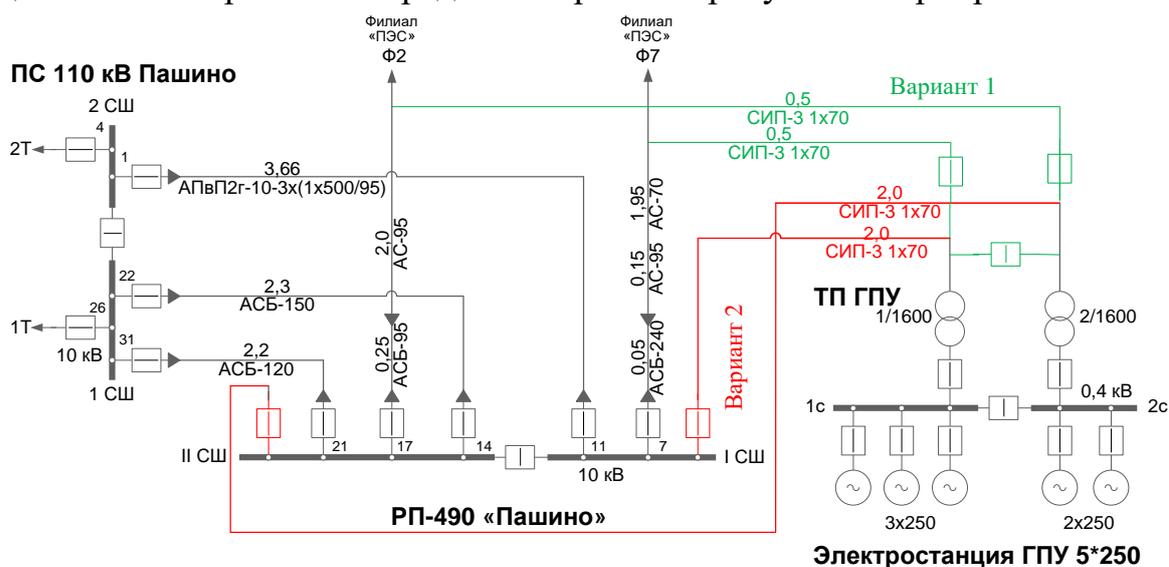


Рисунок 9 – Схема присоединения ГПУ к сети

На основании исследования установившихся электроэнергетических режимов определено:

1. Каждый из рассмотренных вариантов технически реализуем и позволяет обеспечить выдачу всей располагаемой мощности электростанции.
2. В варианте 1 при отключении ф.2 или ф.7 произойдет выделение электростанции на изолированную работу с нагрузкой данных фидеров. При этом нагрузка может быть как сбалансированной с генерацией, так и резко отличаться от нее. В данных условиях требуется ввод в работу дополнительных устройств противоаварийной автоматики (ПА).

3. В обоих вариантах выявлена перегрузка питающих РП-490 кабельных линий электропередачи (КЛ) в послеаварийных режимах. Однако, высокая нагрузка питающих КЛ обусловлена нагрузкой данного района и не связана с вводом электростанции. Иллюстрация данного режима приведена на рисунке 10.

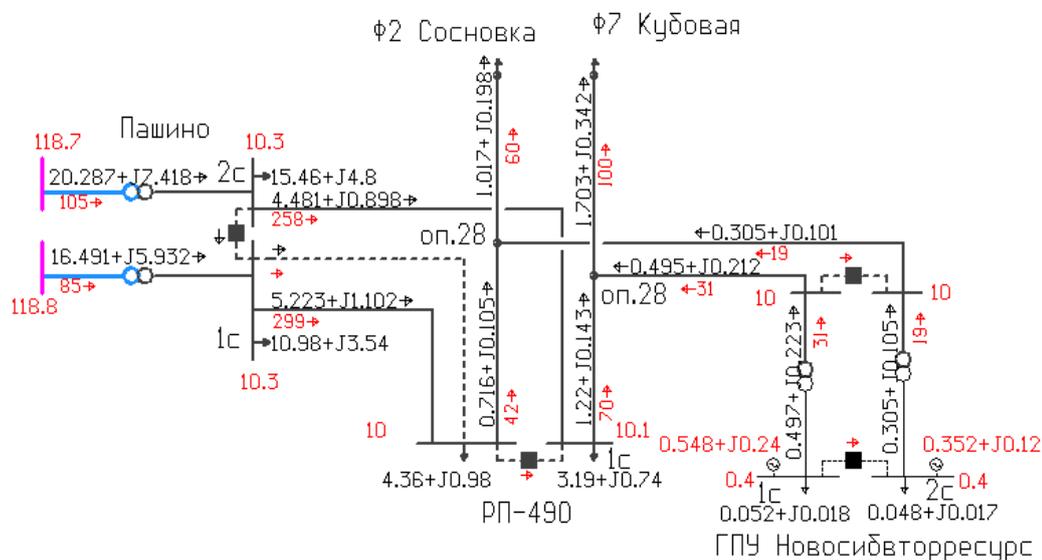


Рисунок 10 – Режим зимнего максимума. Отключение ф.10229. Вариант 1

Исследование режимов КЗ показало, что ввод в работу электростанции приводит к незначительному росту токов КЗ (прирост не более чем на 0,4 кА). Таким образом, ввод в работу электростанции с точки зрения токов КЗ не оказывает существенного влияния на режим работы электрической сети и не требует выполнения дополнительных мероприятий. Максимальные расчетные величины токов КЗ для выбора выключателей на ГПУ приведены в таблице 2

Таблица 2 – Расчетные величины токов КЗ для выбора выключателей на ГПУ

Наименование показателей	Наименование присоединения	
	10 кВ	0,4 кВ
Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ, кА	3,75	43,95
Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, кА	-	54,53

Сравнение суммарных дисконтированных затрат по вариантам в текущем уровне цен (без учета НДС) представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение вариантов

Вариант СВМ	Дисконтированные затраты, тыс. руб.	Соотношение вариантов
Вариант 1	19 870,3	1,01
Вариант 2	19 579,4	1,00

С экономической точки зрения, рассмотренные варианты оказались сопоставимыми. Однако, установка в варианте 1 дополнительного оборудования противоаварийной автоматики требует значительных капитальных затрат, а

впоследствии усложняет обслуживание данных объектов и значительно увеличивает эксплуатационные издержки. При этом подключение ГПУ в варианте 2 к собственным линиям электропередачи (ЛЭП) 10 кВ небольшой протяженности существенно снижает риск аварийного отключения при коротком замыкании на питающей ЛЭП и тем самым сокращает время аварийного простоя, а, следовательно, является более надежным. Таким образом, в качестве рекомендуемого принимается вариант 2.

Для рекомендуемого варианта были определены эксплуатационные издержки (таблица 4), рассчитана величина капитальных затрат на реализацию проекта строительства (таблица 5) и проведена оценка экономически обоснованного тарифа на электрическую энергию и мощность (таблица 6).

Рассчитанные удельные капитальные затраты на реализацию проекта составили 97,96 тыс. руб./кВт. Проведенная оценка показала значительную зависимость тарифа от качества газа, что подтверждает ранее сделанные выводы о необходимости проведения предварительных исследований перед строительством электростанции.

Таблица 4 – Капитальные затраты проекта

Наименование	Количество	Цена, тыс. руб.	Капитальные затраты, тыс. руб.
Блок генерации			
ГПУ 250 кВт	5	3 950	19 750
Система синхронизации с сетью/блоками	1	580	580
Глушитель низкошумный	5	150	750
Контейнер с технологическими системами	5	715	3 575
Пуско-наладочные работы	5	150	750
Помещение для персонала	1	100	100
Дизельная электростанция (ДЭС)	1	1 946	1 946
Газовый блок			
Проектно-изыскательские работы	1	3 000	3 000
Установка очистки газа (УОГ)	1	21 340	21 340
Газосборная станция	1	3 410	3 410
Сборники конденсата	1	2 390	4 780
Газокомпрессорная станция (500м ³ /ч)	1	17 870	17 870
Высокотемпературный факел	1	3 410	3 410
Устройство газовых скважин и трубопроводов	10	2 221	22 210
Прокладка газотранспортных трубопроводов	600	14,835	8 901
Сетевые объекты			
ТП-10/0,4 кВ 2х1600 кВА	1	5 254,12	1 576
ВЛ 10 кВ х 2 км.	1	5 864,64	1 759
яч. 10 кВ х 2 шт.	1	5 539,43	1 662
Суммарные капитальные затраты			122 449,5

Таблица 5 – Эксплуатационные издержки

Наименование		Затраты, тыс. руб./год
Затраты на персонал	Заработная плата	4 560,0
	Страховые взносы	1 368,0
Эксплуатация УОГ	Потери раствора	1 444,3
	Договор на годовое обслуживание	1 500,0
Эксплуатация ГПУ	Обслуживание ГПУ	2 400,0
	Кап. Ремонт (раз в 3 года)	4 937,5*
	Командировочные затраты	1 200,0
Эксплуатация ДЭС	Затраты на дизельное топливо	28,8
	Затраты на обслуживание ДЭС	57,6
Эксплуатация газовой части	Обслуживание	3 098,9
ВСЕГО		15 657,6*

** - Капитальный ремонт не включен в сумму по эксплуатационным издержкам, но учтен в таблице 6 в связи с тем, что он проводится 1 раз в 3 года*

Таблица 6 – Расчет одноставочного тарифа

Год	Расходы связанные с производством	Остаточная стоимость инвестированного капитала	Доход на инв. кап.	Возврат инв. кап.	Необход. валовая выручка	Одност. Тариф мин	Одност. Тариф max
№ п/п	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.	тыс.руб.	руб./МВт.ч	руб./МВт.ч
1	17 366,2	137 143,4	16 457,2	9 142,9	42 966,3	6 031,2	11273,3
2	17 293,4	128 000,5	15 360,1	9 142,9	41 796,4	5 867,0	10966,4
3	22 158,2	118 857,6	14 262,9	9 142,9	45 564,0	6 395,8	11954,8
4	17 147,9	109 714,7	13 165,8	9 142,9	39 456,5	5 538,5	10352,3
5	17 075,1	100 571,8	12 068,6	9 142,9	38 286,6	5 374,3	10045,4
6	21 939,8	91 428,9	10 971,5	9 142,9	42 054,2	5 903,2	11034,0
7	16 929,5	82 286,0	9 874,3	9 142,9	35 946,8	5 045,9	9431,6
8	16 856,8	73 143,1	8 777,2	9 142,9	34 776,8	4 881,6	9124,5
9	21 721,5	64 000,2	7 680,0	9 142,9	38 544,4	5 410,5	10113,1
10	16 711,2	54 857,4	6 582,9	9 142,9	32 437,0	4 553,2	8510,7
11	16 638,4	45 714,5	5 485,7	9 142,9	31 267,0	4 389,0	8203,7
12	21 503,1	36 571,6	4 388,6	9 142,9	35 034,6	4 917,8	9192,1
13	16 492,8	27 428,7	3 291,4	9 142,9	28 927,2	4 060,5	7589,7
14	16 420,1	18 285,8	2 194,3	9 142,9	27 757,2	3 896,3	7282,8
15	21 284,8	9 142,9	1 097,1	9 142,9	31 524,8	4 425,2	8271,4

Далее в главе 4 выполнена оценка влияния объекта генерации на свалочном газе на снижение потерь электрической энергии в распределительной электрической сети. Результаты расчетов приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчетные значения мощности при оценке потерь

Схема сети	Р потр., МВт	ΔP , МВт	ΔP , %	Снижение потерь
Вариант 1 (ГПУ удалено от центра питания)				
Существующая схема	37,563	0,319	0,85%	12%
После ввода ГПУ	37,658	0,282	0,75%	
Вариант 2 (ГПУ приближено к центру питания)				
Существующая схема	37,563	0,319	0,85%	6%
После ввода ГПУ	37,671	0,303	0,8%	

Проведенное исследование подтвердило эффективность применения объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь даже в сети незначительной протяженности. Также расчеты показали, что для варианта 1, в котором объект генерации подключен дальше от центра питания, снижение потерь в два раза больше, чем в варианте 2. Таким образом, эффективность объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической энергии возрастает тем сильнее, чем дальше она подключается в сеть от центра питания.

Для оценки возможности использования объектов генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки в распределительной электрической сети выполнено дополнительное исследование на примере рассматриваемой в главе электрической сети и электростанции на свалочном газе.

В результате ранее выполненных расчетов в рассматриваемой электрической сети выявлена токовая перегрузка питающих линий электропередачи. При этом анализ графика нагрузки по перегружаемой линии, приведенный на рисунке 11, показал, что ток нагрузки превышает допустимый ток только 4-5 часов в сутки и проблему перегрузки можно решить не глобальной реконструкцией сети, а локальными мероприятиями в виде накопителя энергии, который будет отдавать запасаемую за сутки мощность в течение 4-5 пиковых часов.

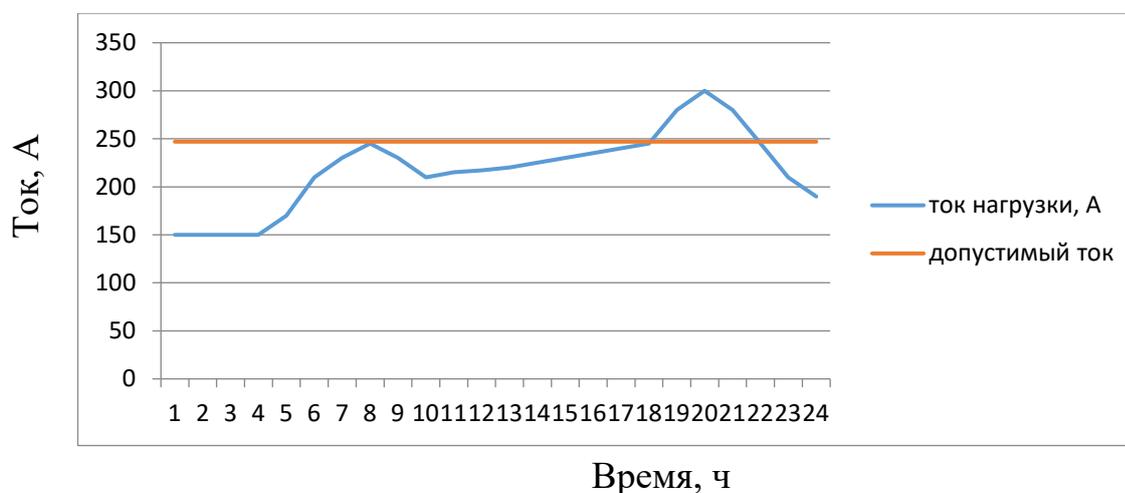


Рисунок 11 – Суточный график нагрузки по перегружаемой линии

При этом электростанция на свалочном газе также может выполнять роль такого накопителя, т.к. в течение суток может выкачивать газ из тела полигона и

сжигать его, вырабатывая электроэнергию не равномерным графиком, а в режиме работы накопителя – то есть в ночные часы минимума потребления снижать выдаваемую мощность, а в пиковые часы нагрузки увеличивать.

В рассматриваемом примере для обеспечения возможности ремонта сетевого оборудования требуется увеличение количества ГПУ на электростанции с 5 до 8. Расчеты загрузки сети для разного количества ГПУ приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Максимальная загрузки сети для разного количества ГПУ

Элементы сети	Переток, МВА	Загрузка, А	Идоп, А	% загрузки
Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 5 блоков				
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10212)	4.491+J0.908	259	602	43,0
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229)	откл.	-	280	-
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10227)	5.227+J1.105	300	247	121,6
ВЛ 10 кВ РП-490 - ТП ГПУ ООО "НВР" №1	0.495+J0.212	30	375	8,0
ВЛ 10 кВ РП-490 - ТП ГПУ ООО "НВР" №2	0.304+J0.1	18	375	4,8
Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 8 блоков				
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10212)	4.978+J1.115	300	602	50
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229)	откл.	-	280	-
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10227)	4.229+J0.656	244	247	99
ВЛ 10 кВ РП-490 - ТП ГПУ ООО "НВР" №1	откл.	30	375	8,0
ВЛ 10 кВ РП-490 - ТП ГПУ ООО "НВР" №2	1.294+J0.524	18	375	4,8

Для оценки экономической эффективности затраты на увеличение количества ГПУ сопоставлялись с затратами на строительство классической системы накопления электрической энергии. Стоимость расширения электростанции составляет 14 895 тыс. руб. Для получения сопоставимого эффекта при использовании классической системы накопления электрической энергии требуется система мощностью 500 кВт и емкостью не менее 1500 кВт/ч. Приближенные капитальные затраты на реализацию такой системы составят порядка 85 млн. руб.

Таким образом, технико-экономическая оценка показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки электрической сети более чем в 5 раз выгоднее применения классической системы накопления энергии при технически сопоставимых параметрах.

В **Заключении** приведены основные выводы и обобщены полученные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана модель и выполнено исследование потенциала использования в мегаполисах объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии. Показано, что в мегаполисах наиболее рационально применение объектов генерации на свалочном газе. Проведен анализ организационных и технических особенностей их работы.

2. Разработаны и верифицированы методика и модель оценки зависимости режима работы объекта генерации на свалочном газе от параметров используемого газа, создана укрупненная информационная карта такой зависимости для оценки эффективности объектов генерации на свалочном газе. Показано, что в зависимости от качества газа рабочая мощность генерирующего оборудования находится в диапазоне 42-68% от установленной мощности.
3. Разработаны математическая и имитационная модель оценки эффективности применения электромагнитного вариатора для обеспечения динамической устойчивости объектов генерации на свалочном газе при их работе в составе электроэнергетической системы. Обосновано, что электромагнитный вариатор может считаться эффективным техническим мероприятием для обеспечения динамической устойчивости ГПУ при аварийных возмущениях в электрической сети.
4. Предложена методика исследования режимов работы объектов генерации на свалочном газе в составе электроэнергетической системы, которая позволяет наиболее точно оценить объем необходимых мероприятий и капитальные затраты для строительства объекта генерации на свалочном газе, а также определить экономический и технический эффекты от данного строительства.
5. Выполнено исследование режимов работы объекта генерации на свалочном газе в составе электроэнергетической системы с учетом оценки установившихся электроэнергетических режимов и режимов короткого замыкания, а также проведена технико-экономическая оценка вариантов его технологического присоединения к электрической сети с определением капитальных и эксплуатационных затрат.
6. Обоснована необходимость пересмотра действующей нормативной документации в части изменения значения коэффициента использования установленной мощности для объектов генерации на свалочном газе. Изменение действующей нормативной документации позволит исключить предъявляемые в настоящее время технически нереализуемые требования к таким объектам.
7. Обоснована зависимость тарифа на электрическую энергию и мощность от качества используемого газа, а, соответственно, и экономической эффективности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования свалочного газа. Оценка показала, что в зависимости от качества газа экономическая эффективность генерирующих объектов, функционирующих на свалочном газе, может отличаться в 2 раза.
8. Подтверждена эффективность применения объектов генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической энергии в распределительной электрической сети. Показано, что снижение потерь может составлять порядка

12% даже в сети незначительной протяженности. При этом чем дальше объект генерации устанавливается от центра питания, тем его эффективность выше.

9. Доказана эффективность использования объектов генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети. Оценка показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для этих целей экономичнее классической системы накопления электрической энергии более чем в пять раз.

Выявленная возможность использования электромагнитного вариатора для обеспечения динамической устойчивости объектов генерации на свалочном газе может быть использована в дальнейшем для научных исследований по обеспечению динамической устойчивости объектов генерации других типов и более глубоких научных исследований с построением опытных образцов и натурными испытаниями.

Использование разработанных методик, информационных карт, математических моделей и алгоритмов позволит существенно упростить процесс технико-экономической оценки, принятия решения, строительства и получения выгодного тарифа для генерирующих объектов, функционирующих на свалочном газе, что позволит существенно увеличить объем такой генерации в мегаполисах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Ачитаев А.А. Оценка эффективности использования возобновляемых источников энергии с учетом необходимости выработки тепловой энергии / А. А. Ачитаев, **А. А. Жидков**, М. В. Кашурников // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. – № 1 (80). – С. 132–142, (0,69/0,45 п.л.).
2. Русина А. Г. Реализация проектов генерации на свалочном газе / А. Г. Русина, А. А. Ачитаев, **А. А. Жидков**, П. Н. Евсеенко // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Том 11. №3 (43) – С. 67–77, (0,44/0,28 п.л.).
3. Ачитаев А.А. Исследование управляемой гибкой связи турбины и генератора микроГЭС в автономной электроэнергетической системе / А. А. Ачитаев, **А. А. Жидков**, С. В. Митрофанов, А. Г. Русина // Электричество. - 2020. – № 1. – С. 25–31, (0,44/0,16 п.л.).
4. Zhidkov A.A. Using Electromagnetic Continuously Variable Transmission in Gas Reciprocating Power Plant to Ensure Dynamic Stability / **A.A. Zhidkov** // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). - Sochi, Russia, 18-22 May 2020. 9111923 P.1-6, (0,375 п.л.), (Scopus).

5. Zhdanovich A.A. Analysis on the Possibility for Construction of a Power Plant using Landfill Gas in Novosibirsk Oblast / A.A. Zhdanovich; **A.A. Zhidkov** // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). - Vladivostok, Russia, 6-9 Oct. 2020. 9271216 P.1-7, (0,44/0,25 п.л.), (Scopus).
6. Achitaev A.A. Landfill Gas Generation Projects Implementation / A.A. Achitaev; S.A. Eroshenko; A.G. Rusina; **A.A. Zhidkov**; P.N. Evseenkov // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). - Ekaterinburg, Russia, 13-15 Nov. 2020. 9281152 P.138-142, (0,31/0,12 п.л.), (Scopus).