

# Оглавление

Список сокращений.....	5
Введение.....	8
1. Моделирование режимов СЭЖД, оснащенных ВИЭ .....	12
1.1. ВИЭ в системах электроснабжения железных дорог .....	12
1.2. Моделирование СЭС с ВИЭ .....	21
1.3. Результаты моделирования СЭЖД с ВИЭ.....	41
1.4. Моделирование режимов СЭЖД с асинхронными генераторами.....	75
1.5. Резервное электроснабжение объектов железнодорожного транспорта .....	85
1.6. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных ветрогенераторами.....	95
1.7. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками инверторной генерации .....	108
Выводы.....	121
2. Управление режимами систем электроснабжения, оснащенных ВИЭ .....	125
2.1. Нечеткая система управления для ветрогенерирующей установки .....	125
2.2. Синтез нечеткого регулятора ВГУ на основе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов .....	140
2.3. Аварийные режимы работы в системах электроснабжения с ВИЭ.....	145
2.4. Применение энергоузелов и возобновляемых источников энергии в интеллектуальных системах электроснабжения.....	164

2.5. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками энергии .....	170
Выводы .....	177
Заключение .....	179
Библиографический список.....	183

## Список сокращений

- АВР — автоматический ввод резервного питания  
АКГ — активный кондиционер гармоник  
АР — автоматический регулятор  
АРВ — автоматический регулятор возбуждения  
АРВ-СД — автоматический регулятор возбуждения  
сильного действия  
АРН — автоматическое регулирование напряжения  
АРС — автоматический регулятор скорости  
АРЧВ — автоматический регулятор частоты вращения  
АСГ — асинхронный генератор  
АЭД — асинхронный электродвигатель  
БСГ — безредукторный синхронный генератор  
В — выключатель  
ВГ — высшие гармоники  
ВГУ — ветрогенерирующая установка  
ВИЭ — возобновляемые источники энергии  
ВЛ — воздушная линия электропередачи  
ВН — высокое напряжение  
ВП — ветропарк  
ВПТ — вставка постоянного тока  
ГА — генетический алгоритм  
ДЧ — датчик частоты вращения  
ЖД — железная дорога  
ИМ — имитационное моделирование  
ИРМ — источник реактивной мощности  
ИСУ — интеллектуальная система управления  
ИСЭС — изолированная система электроснабжения  
КБ — конденсаторная батарея  
КЗ — короткое замыкание  
КПД — коэффициент полезного действия  
КРМ — компенсация реактивной мощности  
КС — контактная сеть  
КУ — компенсирующее устройство  
ЛЭП — линия электропередачи  
МАСУ — мультиагентная система управления  
МИП — многофункциональный измерительный прибор  
МПЗ — межподстанционная зона

НВ — нейтральная вставка  
НН — низкое напряжение  
НП — нетяговый потребитель  
НР — нечеткий регулятор  
НТТ — наиболее нагретая точка  
НЧФ — низкочастотный фильтр  
НЭ — накопитель энергии  
ОВ — обмотка возбуждения  
о. е. — относительные единицы  
ОТП — однофазная тяговая подстанция  
ПИ — пропорционально-интегральный регулятор  
ПИД — пропорционально-интегрально-дифференци-  
альный регулятор  
ПК — программный комплекс  
ПКЭ — показатели качества электроэнергии  
ПН — провал напряжения  
ПС — пост секционирования  
ПСт — подстанция  
ПТ — постоянный ток  
Р — реактор  
РО — районная обмотка  
РР — регулируемый реактор  
РМ — реактивная мощность  
РПК — регулируемые установки поперечной компен-  
сации  
РПН — регулятор напряжения под нагрузкой  
РСЗ — решетчатая схема замещения  
РС — режимная ситуация  
РЭС — район электроснабжения нетяговых потреби-  
телей  
САУ — система автоматического управления  
СВЭ — система внешнего электроснабжения  
СГ — синхронный генератор  
СКО — среднеквадратичное отклонение  
СМЭ — статический многопроводный элемент  
СН — среднее напряжение  
СПИН — сверхпроводящий индуктивный накопитель  
энергии  
СПЧ — статический преобразователь частоты

СТ — симметрирующий трансформатор  
СТЭ — система тягового электроснабжения  
СФЭУ — солнечная фотоэлектрическая установка  
СЭГ — собственная электрогенерация  
СЭЖД — система электроснабжения железной дороги  
СЭС — система электроснабжения  
СЭлС — солнечная электростанция  
Т — турбина  
ТИ — телеизмерения  
ТН — трансформатор напряжения  
ТП — тяговая подстанция  
ТС — тяговая сеть  
ТТ — тяговый трансформатор  
УВ — управляющие воздействия  
УПК — установка продольной компенсации  
ФК — фазные координаты  
ФКЦ — фильтро-компенсирующая цепь  
ФКУ — фильтро-компенсирующее устройство  
ЭПС — электроподвижной состав  
ЭР — энергетический роутер  
ЭЭ — электрическая энергия  
ЭЭС — электроэнергетическая система  
FACTS — flexible alternative current transmission systems  
(гибкая система передачи переменного тока)

## Введение

Для повышения надежности энергоснабжения, улучшения качества электроэнергии и снижения затрат на энергообеспечение на железнодорожном транспорте начинают применяться установки собственной электрогенерации, базирующиеся на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, микро-ГЭС, ветротурбин [1, 2], геотермальных и солнечных электростанций [3].

Применение установок СЭГ может осуществляться по следующим направлениям:

- электроснабжение объектов, расположенных в регионах с неустойчивым энергообеспечением;
- повышение надёжности электроснабжения потребителей, отключение которых может привести к тяжелым последствиям;
- электропитание отдельных объектов относительно малой мощности [4].

Актуальность проблемы применения ВИЭ на транспорте подтверждается большим числом публикаций, в которых предлагаются подходы к ее решению. Так, например, в [5] приведен обзор отказоустойчивых систем тягового электроснабжения и сделан вывод о том, что интеграция ВИЭ обеспечивает снижение ущербов от нарушений и сбоев в сети. Вопросы использования ВИЭ для повышения эффективности СТЭ в Индии рассмотрены в [6]. Результаты изучения процессов короткого замыкания в СТЭ с ВИЭ представлены в [7]. Анализ тяговой сети, имеющей в своем составе ВИЭ проведен в [8]. Методы решения задачи интеграции ВИЭ в СТЭ для снижения углеродных выбросов и стоимости энергии рассмотрены в [9]. Обзор СТЭ, оснащенных ВИЭ приведен в [10]. Важные аспекты, связанные с применением ВИЭ для обеспечения безопасности движения поездов, рассмотрены в [11]. Задача формирования ветро-солнечных СТЭ решена в [12]. Сравнительный анализ вариантов интеграции фотоэлектрических источников в тяговые сети проведен в [13]. Задачи использования солнечных электростанций в энергосистемах транспорта описаны в [14]. Метод формирования графика движения с учетом ветрогенераторов

представлен в [15]. Система тягового электроснабжения с солнечными модулями рассмотрена в [16]. Гибридная СТЭ постоянного тока с ВИЭ описана в [17]. Характеристики фотоэлектрической системы генерации для СТЭ и стратегия ее управления приведены в [18]. Вопросы формирования интегрированной СТЭ с использованием рекуперативной энергии рассмотрены в [19]. Задача выбора перспективных площадок для внедрения солнечных систем стабилизации вечной мерзлоты на железных дорогах решена в [20]. Вопросы эффективности использования фотоэлектрических панелей, размещаемых на крышах локомотивов, рассмотрены в [21].

В современных условиях задачи интеграции ВИЭ должны решаться на основе цифровых моделей, учитывающих специфику СЭЖД, заключающуюся в следующем:

- электроподвижной состав значительно ухудшает качество электроэнергии в сетях нетяговых потребителей, где предполагается использовать установки СЭГ, реализованные на базе ВИЭ;

- нестационарный характер электропотребления приводит к большим отклонениям напряжения на шинах подстанций, к которым подключаются ВИЭ;

- однофазная тяговая нагрузка вызывает заметную несимметрию, иногда значительно превышающую допустимые пределы;

- преобразователи электровозов генерируют в сеть высшие гармоники.

Анализ представленных публикаций показывает, что задачи моделирования СЭЖД, имеющих в своем составе установки СЭГ, использующие ВИЭ, не решены в полном объеме. Комплексный подход к этой проблеме возможно реализовать с помощью алгоритмов, представленных в [22–24]. На их основе может быть создана методика, имеющая следующие отличительные особенности:

- возможности определения режимов с учетом свойств и характеристик сложной СТЭ и питающей электроэнергетической системы (ЭЭС);

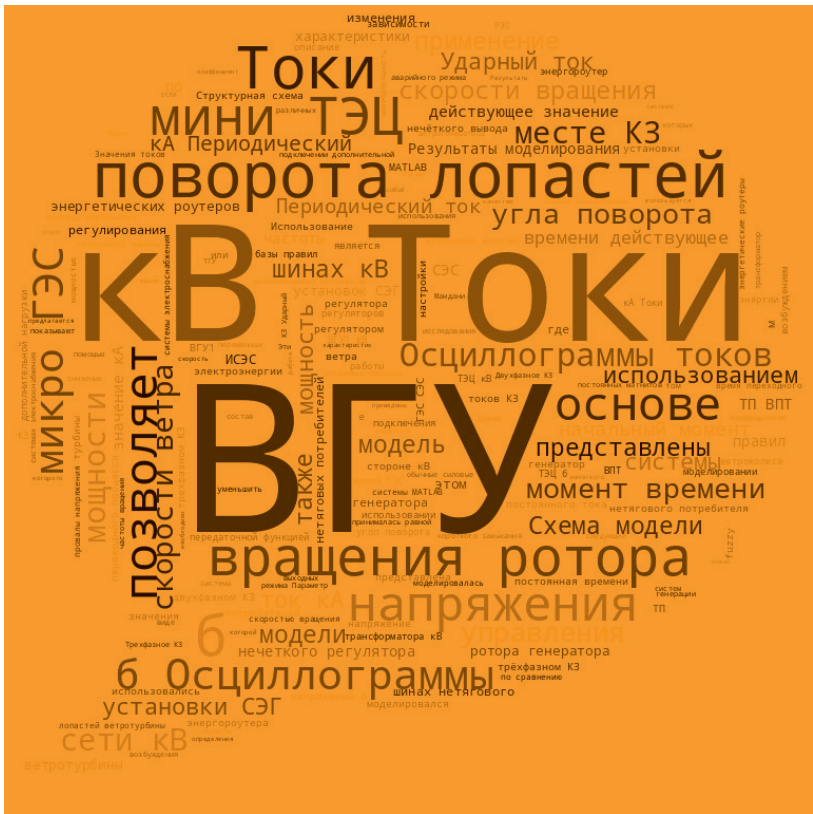
- универсальность, обеспечивающая моделирование тяговых сетей (ТС), ЛЭП и трансформаторов различных конструкций;

- комплексность, заключающаяся в возможности определения нормальных, аварийных и особых режимов СЭЖД, например, возникающих при плавке гололеда в ТС.

В первой части монографии представлены результаты исследований, направленных на разработку цифровых моделей для определения режимов систем электроснабжения железных дорог, оснащенных ВИЭ. Для их реализации применялись методы, базирующиеся на использовании фазных координат, что позволило обеспечить системность, универсальность и комплексность. Системный подход достигался на основе учета всех значимых свойств сложной СЭЖД и питающей ЭЭС. Универсальность обеспечивалась за счет моделирования тяговых сетей, ЛЭП и трансформаторов различного конструктивного исполнения. Комплексность давала возможность определения нормальных, аварийных и особых режимов СЭЖД. Подчеркнуто, что использование ВИЭ может осуществляться по следующим направлениям: электроснабжение объектов, расположенных в регионах с неустойчивым энергообеспечением; повышение надёжности питания потребителей, отключение которых может привести к тяжелым последствиям; обеспечение энергией объектов относительно небольшой мощности.

Во второй части рассмотрены вопросы управления режимами СЭС, оснащенных ВИЭ. Описана нечеткая система регулирования для ветрогенерирующей установки. Выполнен синтез нечеткого регулятора ВГУ на основе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Проанализированы аварийные режимы работы в СЭС с ВИЭ. Показана эффективность применения энергоузелов и ВИЭ в интеллектуальных системах электроснабжения.





# 1. Моделирование режимов СЭЖД, оснащенных ВИЭ

## 1.1. ВИЭ в системах электроснабжения железных дорог

Осуществление процессов перевозок грузов и пассажиров по сети железных дорог невозможно без надежного энергообеспечения тяги поездов и объектов инфраструктуры ЖД транспорта [25–28]. Основными видами энергоресурсов являются топливо, тепло и электрическая энергия. Отраслевыми нормативными документами предусматривается развитие транспортных систем энергообеспечения для получения целевых показателей, характеризующих надежность и качество энергоснабжения и энергетическую эффективность. Последний параметр трактуется как достижение планируемых результатов при минимально возможном для текущего этапа развития расходов энергоресурсов. Одно из основных направлений, обеспечивающих высокие показатели надежности, качества и энергоэффективности, базируется на использовании установок собственной электрогенерации [29–34], в том числе реализованной на базе ВИЭ [1–3].

Особое значение применение технологий СЭГ приобретает в регионах, где устойчивое внешнее электроснабжение железных дорог не обеспечивается в полном объеме. Кроме того, установки СЭГ применяются для гарантированного обеспечения электроэнергией объектов сигнализации, централизации и автоблокировки, которые обеспечивают безопасность движения поездов. В условиях постоянного роста тарифов масштабное применение технологий СЭГ позволяет снижать затраты на энергообеспечение. Кроме того, ниже показано, что наличие установок СЭГ повышает надежность электроснабжения и качество электроэнергии.

Структурная схема, иллюстрирующая энергопотоки типового предприятия железнодорожного транспорта, представлена на *рис. 1.1*. Повышение энергетической эффективности возможно путем модернизации котельной для осуществления когенерации, то есть совместной выработки

тепла и электрической энергии. Для реализации такого подхода можно использовать следующие технические средства: противоаварийные турбины, паровые винтовые машины, а также поршневые двигатели.

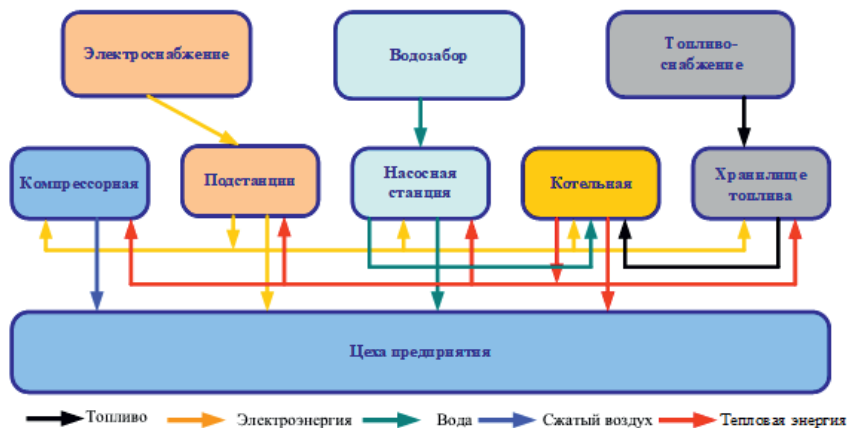


Рис. 1.1. Схема энергетических потоков типичного предприятия ЖД транспорта

Типовые предприятия ЖД транспорта, например, локомотивные и вагонные депо, потребляют мощности порядка нескольких МВ·А. На основе собственных энергоисточников полностью заменить электроснабжение от ЭЭС затруднительно. Однако при их наличии возможно снизить финансовые затраты на энергоснабжение, а также повысить надежность и качество электроэнергии. Решение задач улучшения ПКЭ имеет особую актуальность, так как питание ЖД предприятий выполняется, как правило, от тяговых подстанций пониженными ПКЭ по отклонениям напряжения, несимметрии и несинусоидальности. Следует отметить, что эффект улучшения качества ЭЭ может быть достигнут только при научно-обоснованном выборе мощности и зон расположения установок СЭГ, в том числе и реализованных на базе ВИЭ. Кроме того, успешное решение задачи повышения качества электроэнергии невозможно без эффективных средств автоматического управления ВИЭ.

Применение технологий СЭГ, в том числе основанных на использовании ВИЭ, может осуществляться на ЖД транспорте для решения следующих задач:

- увеличение надежности электроснабжения объектов, расположенных в регионах с недостаточным электросетевым развитием;
- уменьшение числа аварийных отключений потребителей первой категории, прекращение работы которых может привести к значительным ущербам, авариям и угрозе жизни людей;
- реализация третьего независимого источника для потребителей особой группы;
- совмещение трасс железной дороги, автомагистрали, высоковольтных ЛЭП и сетей телекоммуникаций при реализации концепции транспортно-энергетических коридоров (рис. 1.2, 1.3);
- повышение КПД энергопреобразований путем применения когенерации на промышленных и отопительных котельных;
- существенное снижение затрат на энергообеспечение;
- коренное улучшение качества электроэнергии.

Структурная схема системы электроснабжения магистральной железной дороги с установками СЭГ показана на рис. 1.4.

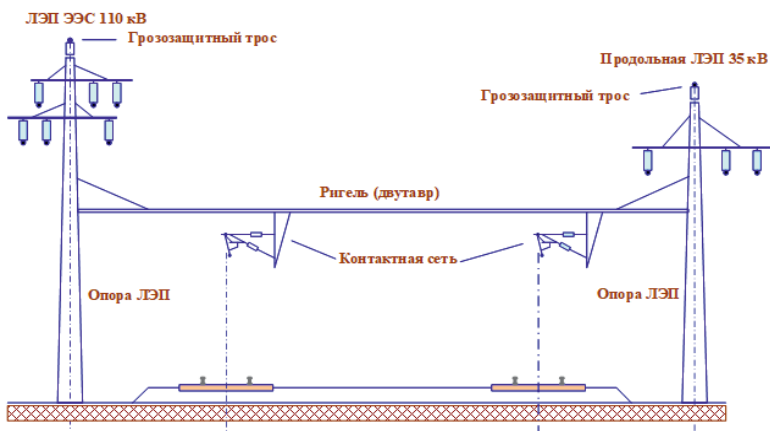


Рис. 1.2. Транспортно-энергетический коридор

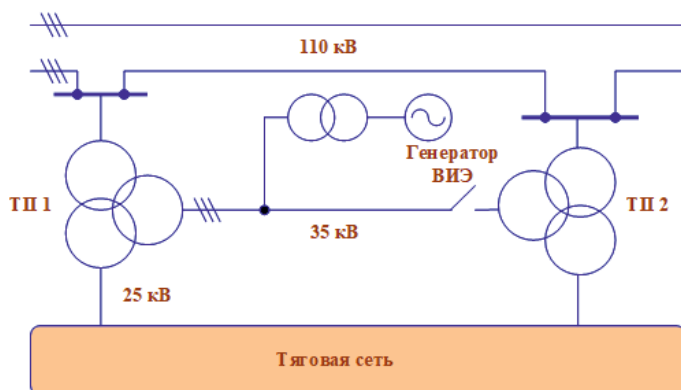


Рис. 1.3. Транспортно-энергетический коридор с мощной установкой СЭГ

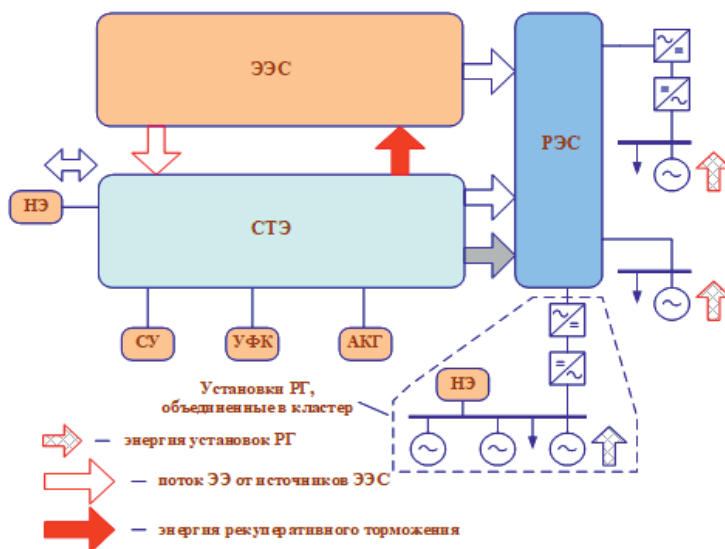
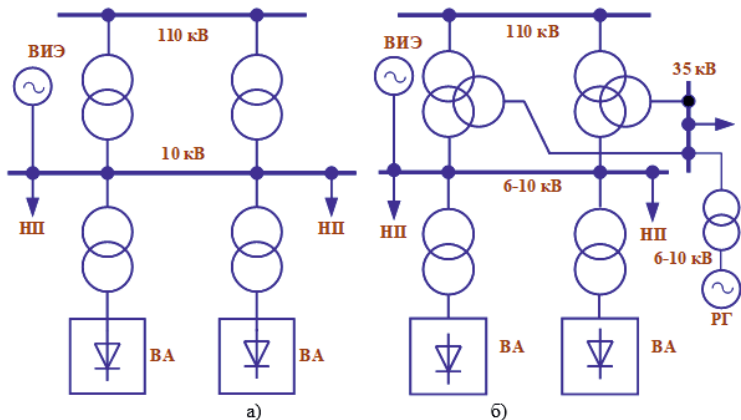


Рис. 1.4. СЭЖД с установками СЭГ

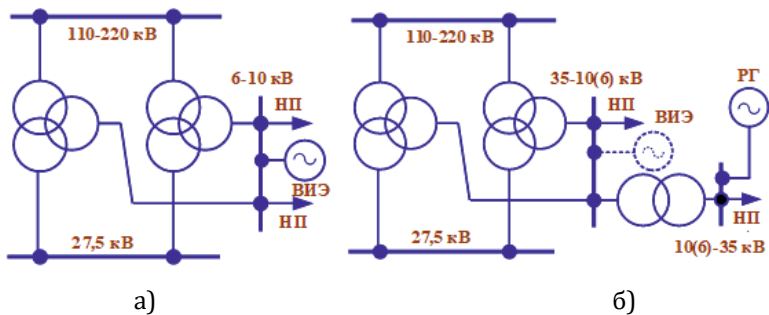
В качестве источника питания на электрифицированных железных дорогах выступают тяговые подстанции; при этом используются типовые схемы, представленные на рис. 1.5–1.7. Установки СЭГ могут включаться в сеть РЭС непосредственно или через ВПТ (рис. 1.7).

При тяге постоянного тока трансформаторы, сблокированные выпрямителями, подключаются к шинам 10 кВ. Присоединение ВИЭ может выполняться по схемам, показанным на *рис. 1.7*.

Способы подключения СЭГ к ТП переменного тока проиллюстрированы на *рис. 1.5*. Присоединение СЭГ может осуществляться к трёхобмоточным тяговым или районным понизительным трансформаторам (*рис. 1.6*). Когда в РЭС используется одно питающее напряжение, наиболее приемлемой является схема, представленная на *рис. 1.5, а*. При наличии нагрузок двух напряжений может применяться схема, показанная на *рис. 1.5, б*.



*Рис. 1.5.* Подключение ВИЭ к ТП постоянного тока



*Рис. 1.6.* Подключение ВИЭ к ТП переменного тока

При значительном искажении качества электроэнергии, вызванном тяговой нагрузкой, можно подключать установки СЭГ через вставку постоянного тока (рис. 1.7); при этом для присоединения ВИЭ появляется удобный интерфейс — шины ПТ.

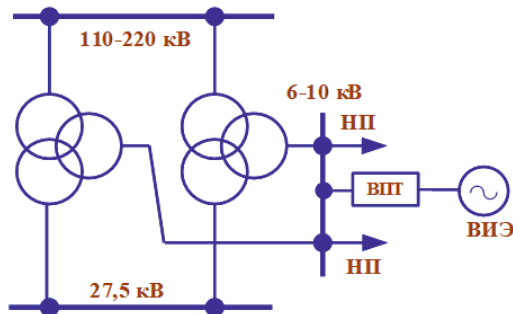


Рис. 1.7. Использование вставки постоянного тока

При наличии мощных стационарных потребителей целесообразна организация питания районных и тяговых нагрузок от отдельных трансформаторов или от автотрансформаторов (рис. 1.8 и 1.9).

В перспективных ТС повышенного напряжения ТП предполагается размещать на ЖД узлах; на таких ТП можно использовать ВИЭ большой мощности. Для их подключения целесообразно применять специальные трансформаторы (рис. 1.10).

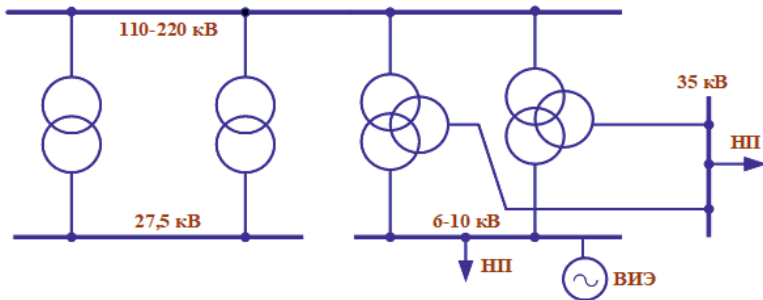


Рис. 1.8. Питание мощных нетяговых потребителей от ТП и ВИЭ

Современный уровень развития технологий ВИЭ позволяет реализовывать установки сравнительно СЭГ небольшой мощности. Их можно присоединять к линиям продольного электроснабжения (рис. 1.11–1.13). Из-за пониженного качества электроэнергии в линиях ДПР подключение СЭГ к таким ЛЭП целесообразно выполнять через ВПТ.

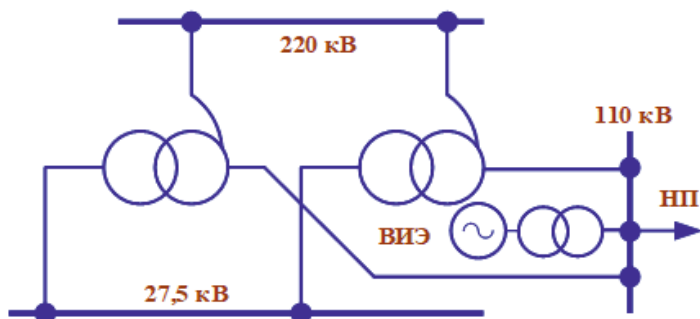


Рис. 1.9. Питание нетяговых потребителей от ТП с автотрансформаторами и ВИЭ

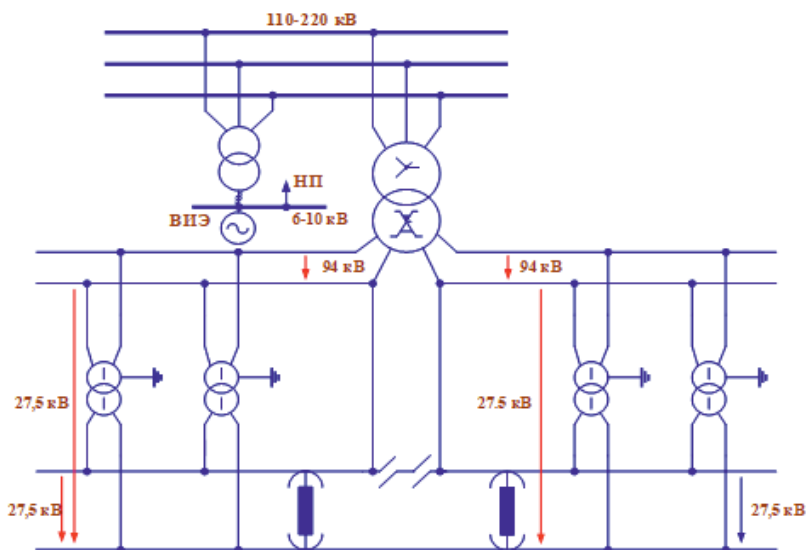


Рис. 1.10. Подключение ВИЭ к ТП СТЭ повышенного напряжения



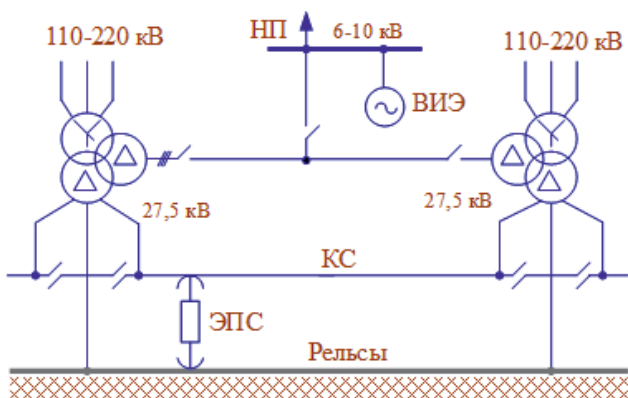


Рис. 1.11. ВИЭ, подключенные к линии продольного электроснабжения

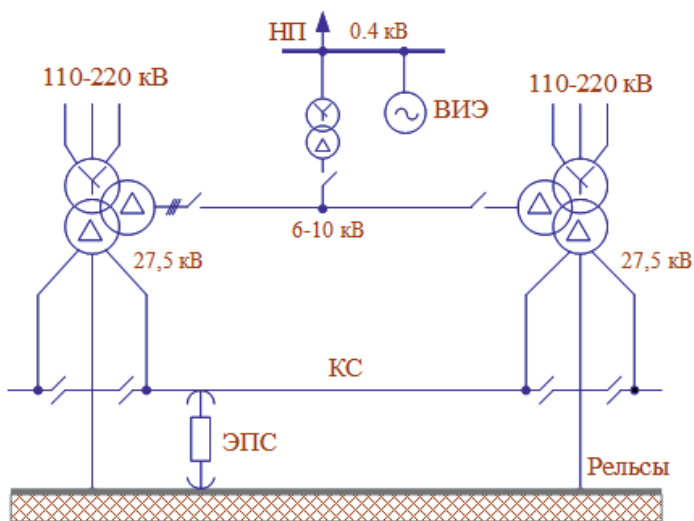


Рис. 1.12. Низковольтный ВИЭ, подключенный к ЛЭП ПЭ

Для подключения установок СЭГ непосредственно к тяговой сети может использоваться схема, показанная на рис. 1.14. В состав этой СЭС входят следующие устройства:

- преобразователь числа фаз по обращенной схеме Штейнмеца, для получения симметричной трехфазной системы напряжений;

- активный кондиционер гармоник, позволяющий снижать амплитуды ВГ, создаваемые электровозами;
- управляемый источник реактивной мощности, поддерживающий требуемый уровень напряжения в точке подключения линии, питающей потребитель с ВИЭ.

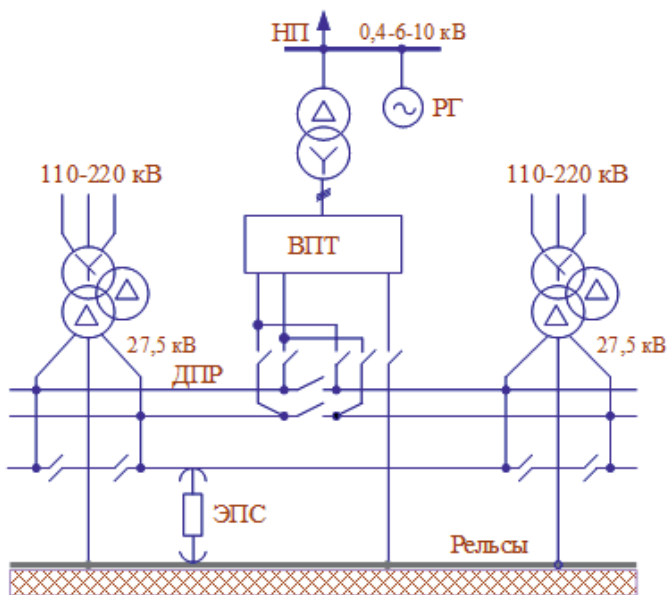


Рис. 1.13. ВИЭ, подключенной к линии ДПР

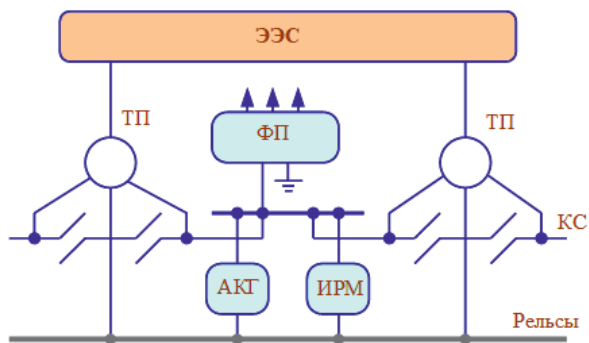


Рис. 1.14. Схема системы электроснабжения (СЭС)

Надежное и качественное электроснабжение по схеме, показанной на *рис. 1.14*, может быть реализовано только на основе комплексного использования активных элементов, входящих в состав предполагаемой СЭС.

## **1.2. Моделирование СЭС с ВИЭ**

При проектировании и эксплуатации СЭС возникает множество задач, связанных с расчетами несимметричных режимов. Как правило, они решаются с применением метода симметричных составляющих [35], требующего индивидуального подхода в каждом конкретном случае. К ним относятся расчеты режимов СЭС, имеющих ЛЭП с расщепленными проводами и грозозащитными тросами. Сюда же примыкают и задачи определения наведенных напряжений на смежные линии со стороны высоковольтных или сильноточных ЛЭП. Стоит отметить, что расчеты режимов многофазных ЛЭП напрямую связаны с учетом взаимовлияния проводов разных фаз, и при такой постановке требуется рассмотрение процессов в фазных координатах. При этом расчет режима многопроводной системы с учетом взаимных электрических и магнитных влияний позволяет определить наведенные напряжения на смежных проводах и решать вопросы электромагнитной совместимости.

Определение потерь мощности в различных элементах СЭС при несимметричных нагрузках также требует пофазного рассмотрения. Простое наложение потерь от симметричных составляющих неприемлемо. Например, в трансформаторах из-за влияния магнитопровода симметричное входное напряжение создает несимметричную систему токов.

Для расчетов сложносимметричных режимов трехфазных СЭС чаще всего применяют два метода: симметричных составляющих и фазных координат. МСС основан на составлении трех однолинейных схем замещения для прямой, обратной и нулевой последовательностей с последующим расчетом режима каждой из них и наложением трех решений; при этом требуется нетривиальный подход при решении каждой конкретной задачи, что существенно усложняет формализацию

и затрудняет реализацию программных средств для расчета режимов. Кроме того, метод реально применим только в случае простых однократных несимметрий, а при увеличении их числа резко возрастают сложности использования.

Метод фазных координат развивается давно [36–38] и является естественным представлением многофазных электрических цепей. Главная проблема при его применении для расчета режимов ЭЭС связана с наличием взаимоиндуктивных влияний между токоведущими частями в электрических машинах, трансформаторах и ЛЭП. Известный метод развязки магнитосвязанных цепей при практической реализации в программных средствах приводит к ряду затруднений, ограничивающих его использование в электроэнергетических задачах. Для их преодоления осуществляют замену трехфазного трансформатора набором однофазных. В качестве примера можно указать на широко известный пакет Sim Power System системы MatLab. Для линий электропередачи иногда применяют П-образные схемы замещения отдельных фаз без их взаимоиндуктивной связи. Эти модели удовлетворительно работают только при сравнительно небольших несимметриях.

Использование ФК необходимо при учете различий в пофазных параметрах линии, для расчетов режимов мультифазных сетей, при рассмотрении трансформаторов с особыми схемами соединений обмоток, а также для определения взаимных электромагнитных влияний ЛЭП. При наличии соответствующих моделей элементов СЭС расчеты можно выполнять, используя наработанные методики определения режимов, рассматривая схему в ФК в качестве фиктивной схемы прямой последовательности.

Базисом метода ФК является естественное многолинейное представление мультифазных электрических схем, в котором весьма просто учитываются однофазные и многофазные элементы. Имеющиеся алгоритмы расчетов режимов в однолинейной постановке с некоторыми ограничениями и дополнениями могут быть применены и для фазных координат. Такая постановка позволяет достаточно легко учесть разнообразные несимметрии ЛЭП, вызванные, например,

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)