

А. В. ЩЕГОЛЬКОВ, А. В. КОБЕЛЕВ

ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ



**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А. В. ЩЕГОЛЬКОВ, А. В. КОБЕЛЕВ

ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Утверждено Ученым советом
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
в качестве учебного пособия для студентов 2, 3 курсов, обучающихся
по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
всех форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026

УДК 621.31
ББК 31.2
Щ34

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой ЮРГПУ(НПИ) имени М. А. Платова
М. С. Липкин

Доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
Ю. В. Родионов

Щегольков, А. В.

Щ34 Приемники и потребители электрической энергии [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Щегольков А. В. Кобелев. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 3,0 Mb ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-3028-3

Предложен практико-ориентированный подход к изучению современных электроприемников и потребителей энергии, охватывающий их классификацию, принципы взаимодействия с электрическими сетями и эксплуатационные аспекты. Особое внимание уделено устройствам на основе управляемых полупроводниковых ключей и возможностям их программного управления. Анализ конструктивных особенностей и режимов работы оборудования направлен на формирование у обучающихся системных знаний и навыков, необходимых для решения задач, связанных с приемниками и потребителями электрической энергии.

Предназначено для студентов 2, 3 курсов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», всех форм обучения.

УДК 621.31
ББК 31.2

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком. Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

ISBN 978-5-8265-3028-3

©Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2026

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Приемники и потребители электрической энергии» является базовым элементом дисциплины «Приемники и потребители электрической энергии», направленной на формирование у инженеров-энергетиков целостного понимания электрохозяйства – ключевого звена энергосистемы.

Цель пособия – сформировать у студентов систему знаний о классификации, режимах работы, методах расчета и принципах рациональной организации электрохозяйства потребителей, а также развить практические навыки оптимизации систем электроснабжения и представления об основных типах электроприемников, принципах их работы и критериях выбора. Изучить классификацию потребителей (по надежности, характеру нагрузок, режимам работы). Освоить методологию прогнозирования электропотребления и расчета электрических нагрузок. Научить выбирать оборудование систем электроснабжения на основе нормативных требований и расчетных данных. Рассмотреть принципы организации учета электроэнергии, энергоаудита и методы энергосбережения (компенсация реактивной мощности, регулируемый электропривод).

Рассмотрим такие понятия, как:

- Интеллектуализация и цифровизация (АИИС КУЭ, IoT, цифровые двойники).
- Интеграция распределенной генерации (активный потребитель, ВИЭ).
- Появление новых нагрузок (электротранспорт, ЦОД, майнинг).
- Интеграция в Индустрию 4.0 с использованием машинного обучения и управления спросом.

Таким образом, современный специалист должен обладать не только классическими знаниями, но и компетенциями в области цифровых технологий и управления сложными гибридными системами.

1. СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

1.1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Энергетическая система (энергосистема) – это единый технологический комплекс, включающий все электростанции, электрические и тепловые сети страны или региона, управляемые как единое целое для непрерывного процесса производства, преобразования, передачи и распределения энергии.

Электрическая часть энергосистемы – подмножество энергосистемы, охватывающее только объекты, связанные с электроэнергией (электростанции, линии электропередачи, подстанции).

Электроэнергетическая система – это электрическая часть энергосистемы вместе с подключенными к ней потребителями, объединенными общим процессом производства и потребления. Если энергосистема – это «поставщик», то электроэнергетическая система – это единая экосистема «поставщик + потребители».

Потребители и их режимы работы

- *Приемник электрической энергии (электроприемник)* – это конечное устройство, преобразующее электричество в другой вид энергии (свет, тепло, движение). Примеры: электродвигатель станка, светильник, компьютер.

- *Потребитель электрической энергии* – это технологически и территориально объединенная группа электроприемников. Примеры: цех завода, жилой дом, больница. Это юридическое лицо или объект, заключивший договор энергоснабжения.

Режимы работы потребителя

Нормальный режим – работа с заданными параметрами (напряжение, частота).

Послеаварийный режим – состояние после сбоя в системе электроснабжения, но до полного восстановления нормального режима.

На рисунке 1.1 изображена электроэнергетическая система.

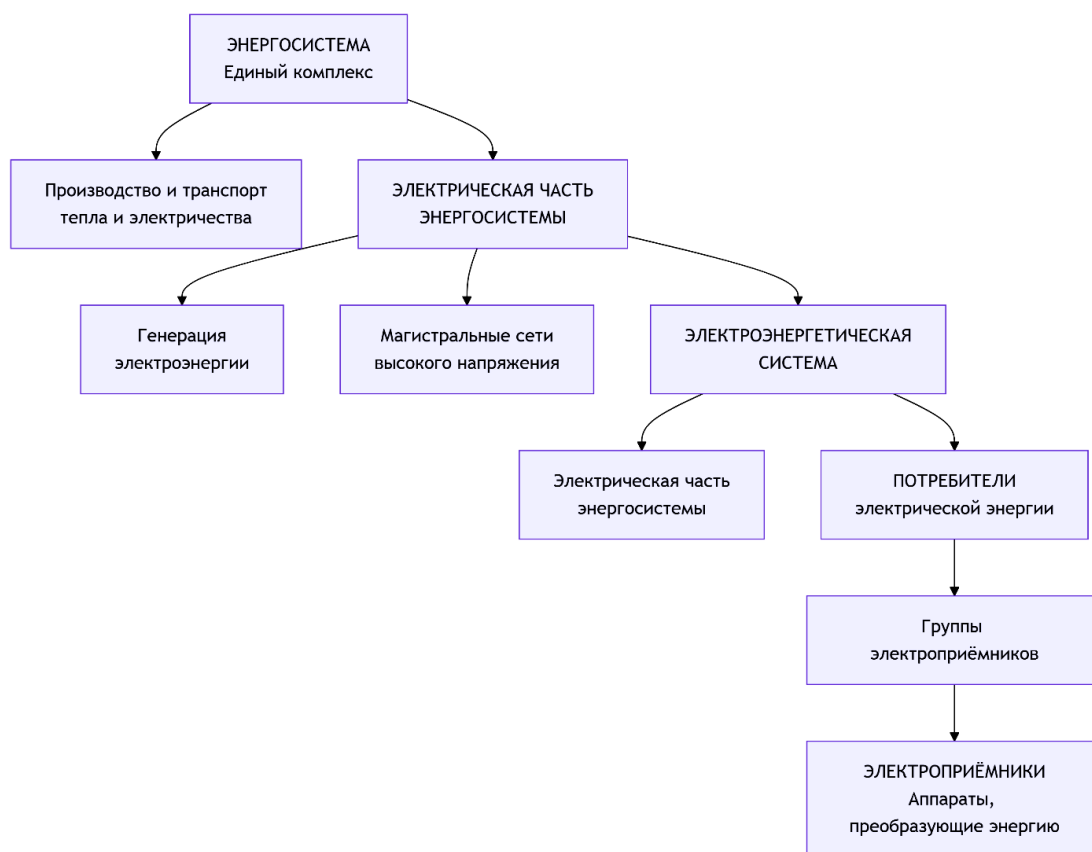


Рис. 1.1. Электроэнергетическая система

Ключевое требование надежности: независимый источник питания. Это источник, который сохраняет напряжение в допустимых пределах при пропадании питания на другом источнике. Это основной принцип резервирования для ответственных потребителей.

Независимыми считаются, например, две секции шин подстанции, если:

- 1) каждая питается от своего независимого источника (например, разных линий или трансформаторов);
- 2) между этими секциями нет связи или есть автоматический выключатель (АВР), который разъединяет их при аварии на одной.

Особенности (характеристики) потребителей электрической энергии

1. Категория надежности электроснабжения (ГОСТ, ПУЭ):

– *I категория (особая группа):* бесперебойное питание критически важно для предотвращения угрозы жизни людей, национальной безопасности, массовых убытков (например, хирургические отделения больниц, системы оборонных предприятий). Требуется двух независимых источников питания + АВР

(автоматический ввод резерва), часто – резервные ДГУ (дизель-генераторные установки);

– *I категория*: перерыв в питании недопустим из-за угрозы безопасности людей, массового брака продукции, повреждения оборудования (химические производства, котельные). Требуется двух независимых источников + АВР;

– *II категория*: допускает перерыв в питании на время, необходимое для включения резерва дежурным персоналом или выездной бригадой (не более нескольких часов). Это большинство промышленных предприятий, многоквартирные жилые дома, учреждения;

– *III категория*: все остальные потребители, для которых допустимы перерывы в питании до 24 часов (единовременно) и до 72 часов в год суммарно (некоторые цеха, склады, частный жилой сектор).

2. Режим электропотребления (график нагрузки):

– *постоянный* (стабильная нагрузка в течение суток);

– *переменный* (ярко выраженные пики и спады, например, утром и вечером у населения);

– *сезонный* (зависит от времени года: отопление зимой, кондиционирование летом, сельхозработы).

3. Критерий качества электроэнергии: чувствительность к отклонениям напряжения, частоты, гармоническим искажениям (точное машиностроение, лаборатории, центры обработки данных).

4. Уровень напряжения:

– *высокое напряжение (110 кВ и выше)*: крупные заводы, тяговые подстанции электропоездов и троллейбусов;

– *среднее напряжение (6...35 кВ)*: средние предприятия, городские распределительные сети;

– *низкое напряжение (220/380 В)*: бытовые потребители, малый бизнес, офисы.

Основные типы потребителей (по виду деятельности) показаны в табл. 1.1.

1.1. Типы потребителей с их основными характеристиками и примерами

Тип потребителя	Характер нагрузки и особенности	Примеры	Категория надежности (типично)
1. Промышленные предприятия	Высокая и постоянная мощность, наличие крупных двигателей (низкий $\cos\varphi$), часто собственные подстанции. Чувствительны к перерывам	Металлургические, химические, машиностроительные заводы, горнообогатительные комбинаты	I или II
2. Транспорт на электрической тяге	Резкопеременная нагрузка с большими бросками тока при пуске. Подвижные и распределенные по сети	Электропоезда (Ж/Д), троллейбусы, трамваи, метрополитен	I (особая для метро)
3. Население (бытовые потребители)	Ярко выраженный нерегулярный суточный и сезонный график. Низкое единичное потребление, но огромное количество точек. Чувствительность к напряжению	Городские и сельские жилые дома, квартиры, частные домохозяйства	II–III
4. Коммерческий сектор и учреждения	Режим работы совпадает с деловыми часами. Значительная доля осветительных и климатических систем	Офисные центры, торговые комплексы, гостиницы, банки, госучреждения	I или II
5. Сельскохозяйственные потребители	Выраженная сезонность, рассредоточенность по большой территории, низкая плотность нагрузки. Часто низкое качество сетей	Животноводческие комплексы, зернохранилища, системы орошения, предприятия по переработке	II–III
6. Объекты инфраструктуры	Постоянный или непрерывный режим работы. Критическая важность для функционирования общества	Водоканалы и очистные сооружения, котельные, больницы, узлы связи, ЦОДы	I (особая или обычная)

Практическое значение классификации

Потребителям (особенно промышленным): выбирать оптимальный тарифный план, внедрять системы компенсации реактивной мощности ($\cos\varphi$), что снижает платежи, организовывать собственное энергоснабжение для повышения надежности.

Учет и регулирование реактивной мощности: цели, проблемы и решения

1. Основные цели учета реактивной мощности

В современных энергосистемах учет реактивной мощности (РМ) преследует в первую очередь *технические и оперативные цели*.

Коэффициент мощности (cosφ): показывает, какая часть мощности является активной (полезной). Низкий cosφ у потребителей с большой индуктивной нагрузкой (электродвигатели, трансформаторы без компенсации) создает дополнительные потери в сетях. При это следует реализовывать и учитывать:

Контроль перетоков РМ по межсистемным связям: обеспечение стабильности параллельной работы энергообъединений, предотвращение несанкционированных циркуляционных потоков мощности.

Мониторинг баланса генерации и потребления РМ: контроль за тем, чтобы потребители не превышали установленные нормативы потребления или выдачи реактивной энергии, что напрямую влияет на качество напряжения в узлах сети.

Базу для технико-экономического обоснования: данные учета служат основой для планирования мероприятий по компенсации РМ и оценки их эффективности.

2. Экономический и технический ущерб от нерациональных перетоков РМ

Повышенное и нерегулируемое потребление или генерация РМ наносит ущерб всем участникам процесса. Для поставщиков *снижение пропускной способности* сетей, так как существующие линии и трансформаторы загружаются бесполезным реактивным током. *Увеличение потерь активной мощности (ΔP)* в элементах сети, которые прямо пропорциональны квадрату полного тока ($\Delta P = I^2 R$). Рост реактивной составляющей тока ведет к прямым финансовым потерями и *ухудшению качества электроэнергии*: просадки напряжения при потреблении РМ и перенапряжения при ее избыточной генерации (перекомпенсации).

Для потребителя: необходимость увеличения сечения кабелей и мощности трансформаторов, что ведет к финансовым затратам при модернизации, так как повышенные токи ведут к перегреву проводки и активных частей трансформаторов, а перенапряжения – к ускоренному старению изоляции.

3. Критическая проблема: круглосуточная работа нерегулируемых конденсаторных установок (КУ)

Неконтролируемая генерация РМ столь же вредна, как и ее избыточное потребление. Режим постоянной работы нерегулируемых КУ приводит к каскаду негативных последствий:

1. *Перекомпенсация в часы минимума нагрузки:* когда собственная реактивная нагрузка предприятия (Q_{\min}) падает, а КУ продолжают работать, возникает выдача избыточной РМ ($Q_{\text{ку}} - Q_{\min}$) в сеть.

2. *Повышение уровня напряжения:* избыточная РМ вызывает рост напряжения в узлах сети, особенно опасный в ночные часы. Это приводит к:

– сокращению срока службы оборудования: для изоляции обмоток АД износ ускоряется (коэффициент R_o);

– выходу из строя конденсаторов самих КУ при длительном превышении напряжения более чем на 10%;

– ухудшению технологических процессов: перегрев электролизных ванн, брак в электротермических установках.

3. *Рост потерь активной мощности:* происходит как в сети предприятия (ΔP_c), так и в самом оборудовании КУ (ΔP_k) и трансформаторах ($\Delta P_{\text{тр}}$).

Формула износа изоляции АД (упрощенно):

$$R_o \approx (U_{\text{факт}}/U_{\text{ном}})^2,$$

где рост напряжения на 5% увеличивает износ изоляции на 10%.

4. Решение: автоматическое регулирование реактивной мощности

Необходимость в автоматизированных конденсаторных установках (АКУ) или других регуляторах вызвана стремлением устранить указанные проблемы.

Принцип работы и преимущества АКУ:

- измерение текущего cosφ или потока РМ в реальном времени;
- автоматическое подключение/отключение ступеней конденсаторов для поддержания заданного уровня компенсации;
- исключение режимов перекомпенсации и недокомпенсации;
- результаты внедрения АКУ: снижение потерь активной мощности в сетях потребителя и энергосистемы;
- стабилизация уровня напряжения в узлах сети, что повышает качество электроэнергии;
- снижение нагрузки на генераторы энергосистемы, которые в режиме перекомпенсации вынуждены работать в емкостном режиме, потребляя РМ;
- продление срока службы электрооборудования за счет поддержания нормативного уровня напряжения.

5. Вывод и экономический эффект

Учет реактивной мощности – это не фискальная мера, а важнейший инструмент *технико-экономического анализа и управления режимами* энергосистемы. Успешное решение проблемы регулирования РМ путем внедрения АКУ позволяет достичь комплексного эффекта:

1. *Экономия электроэнергии* за счет снижения потерь активной мощности (до 10...20% от потерь в распределительных сетях).
2. *Повышение пропускной способности* существующих электросетей без их реконструкции.
3. Улучшение качества и надежности электроснабжения.
4. *Снижение эксплуатационных затрат* и продление межремонтных сроков оборудования.

Таким образом, переход от пассивной компенсации к *интеллектуальному автоматическому регулированию реактивной мощности* является необходимым условием для энергоэффективной и устойчивой работы как предприятий-потребителей, так и энергосистемы в целом.

Физическая и экономическая сущность реактивной мощности

Реактивная мощность (Q , измеряется в вар, квар, Мвар) – это мощность, которая не совершает полезной работы, но циркулирует между источником (сетью) и нагрузкой (например, электродвигателями, трансформаторами), создавая дополнительную нагрузку на сеть.

- *Физически*: она необходима для создания магнитных полей в электродвигателях и трансформаторах.
- *Экономически*: ее передача вызывает дополнительные потери в проводах, трансформаторах и генераторах, требует увеличения сечения кабелей и мощности оборудования.

Аспекты учета реактивной мощности

Учет ведется для контроля и экономического стимулирования потребителей к ее компенсации (табл. 1.2).

1.2. Аспекты учета реактивной мощности

Аспект учета	Описание и практическое применение
Цели учета	1. Контроль качества электропотребления (соблюдение нормативов $\text{tg}\varphi$ или $\cos\varphi$). 2. Финансовые расчеты – начисление штрафов за повышенное потребление РМ или скидок за ее компенсацию. 3. Технический анализ – оценка режимов работы сети и оборудования
Приборы учета	Используются счетчики реактивной энергии (индукционные или, чаще, электронные), которые могут быть: – одно- или многотарифными; – одно- или многофункциональными (измеряют P , Q , S , $\cos\varphi$, гармоники и т.д.)
Нормативы и точки учета	1. Для потребителей с присоединенной мощностью > 150 кВт установка счетчика РМ обязательна (Правила розничного рынка электроэнергии). 2. Учет ведется на границе балансовой принадлежности (на вводе). 3. Нормативное значение $\text{tg}\varphi$ (тангенс фи) обычно не должно превышать 0,4 (что соответствует $\cos\varphi \approx 0,93$) в часы максимальных нагрузок сети
Финансовые механизмы	Существует два основных подхода: 1. Штрафы (надбавки) за потребление РМ сверх нормы. Рассчитывается по формуле: $\text{Плата за РМ} = (\mathcal{E}_{\text{реакт}} - \mathcal{E}_{\text{актив}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{норм}}) \cdot \text{Тариф.}$ 2. Учет по полной мощности (кВА). В этом случае потребитель платит за всю кажущуюся мощность, что автоматически стимулирует его повышать $\cos\varphi$ (например, в тарифах для малого бизнеса)

Аспекты компенсации реактивной мощности (КРМ)

1. Принципы и места установки устройств КРМ

Параллельно индуктивной нагрузке (которая потребляет РМ) подключается *емкостная нагрузка* (которая РМ генерирует). Они компенсируют друг друга.

Индивидуальная компенсация: устройства (чаще всего конденсаторы) подключаются непосредственно к клеммам мощного электродвигателя (например, насоса, вентилятора). Компенсация наиболее эффективна, но применяется для постоянных нагрузок.

Групповая компенсация: установка компенсирующего устройства на группу нагрузок (например, на шины распределительного щита цеха).

Централизованная компенсация: установка автоматической конденсаторной установки (АКУ) на вводе питания всего предприятия. Наиболее гибкий и распространенный способ.

Типы устройств компенсации реактивной мощности показаны в табл. 1.3.

1.3. Типы устройств компенсации

Тип устройства	Принцип работы и назначение	Преимущества	Недостатки/особенности
Конденсаторные установки (КУ, АКУ)	Батареи силовых конденсаторов, включаемые ступенчато для компенсации индуктивной РМ	Просты, дешевы, имеют низкие потери	Срок службы зависит от температуры и гармоник. Требуемая защита
Синхронные компенсаторы	Специальные синхронные двигатели, работающие в режиме перевозбуждения (генерируют РМ)	Плавное регулирование, устойчивы к гармоникам	Высокие потери на собственные нужды, дороги в обслуживании
Синхронные электродвигатели	Работа существующих СД на предприятии в режиме перевозбуждения	Использование имеющегося оборудования	Регулировка ограничена технологическим процессом
Статические тиристорные компенсаторы (СТК)	На основе тиристорных ключей, управляющих реакторами или конденсаторами	Быстродействие (менее 20 мс), высокая точность	Высокая стоимость, сложность, генерация гармоник
Устройства на основе IGBT-технологии (APF, SVG)	Активные фильтры и статические генераторы РМ. Генерируют компенсирующий ток, точно противоположный по форме нагрузочному	Высшая степень компенсации: компенсируют РМ, симметрируют фазы, фильтруют гармоники	Наиболее дорогое решение, требует квалифицированного обслуживания

Алгоритм организации КРМ на предприятии

Энергоаудит: замеры существующего $\cos\varphi$, графиков нагрузок, уровня гармоник в сети.

Ключевой показатель – коэффициент мощности ($\cos\varphi$): отношение активной мощности (P , кВт) к полной (S , кВА).

1. *Расчет требуемой мощности компенсации* (Q_k , квар) (рис. 1.2).
2. *На основе данных счетчиков или формул:*

$$Q_k = P_{\text{ср}} (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2),$$

где $\text{tg}\varphi_1$ – текущий; $\text{tg}\varphi_2$ – целевой.

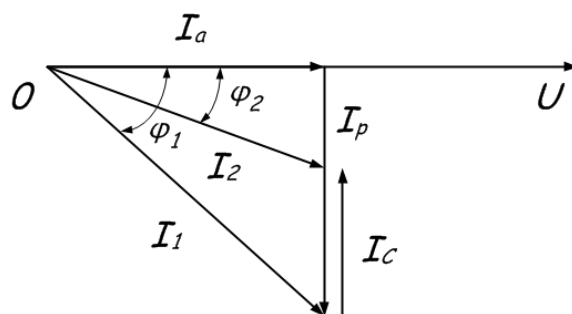


Рис. 1.2. Векторная диаграмма токов и напряжения

3. *Выбор места и типа компенсации:* определение, где ставить: централизованно (АКУ) или дополнительно индивидуально/группами.

4. *Выбор устройства:* при наличии нелинейных нагрузок (частотные преобразователи, дуговые печи) и высокого уровня гармоник – предпочтение активным фильтрам (APF) или конденсаторам с дросселями (фильтрокомпенсирующие установки) для избежания резонанса.

5. *Проектирование и монтаж* с учетом требований ПУЭ.

6. *Наладка и ввод в эксплуатацию:* настройка уставок АКУ, проверка корректности работы.

7. *Мониторинг и обслуживание:* регулярный контроль $\cos\varphi$, температуры, состояния конденсаторов.

Особые случаи и современные подходы

- *Компенсация при несинусоидальных напряжениях* (высшие гармоники): наличие гармоник требует применения фильтрокомпенсирующих установок (ФКУ) или активных фильтров (APF), так как обычные конденсаторы могут перегружаться и выходить из строя.

- **Совмещение КРМ с другими задачами:** современные активные компенсаторы (SVG) решают комплекс задач: компенсация РМ, фильтрация гармоник, симметрирование нагрузки по фазам, стабилизация напряжения.

- **Интеграция с системами Smart Grid:** умные компенсирующие устройства могут дистанционно управляться и работать как регулируемый элемент сети, обеспечивая ее устойчивость.

Эффективная компенсация РМ позволяет снизить счета за электроэнергию на 10...30% (за счет исключения штрафов и снижения потерь), увеличить пропускную способность существующих кабелей и трансформаторов, а также стабилизировать напряжение в сети.

1. Проблема выбора и эксплуатации компенсирующих устройств

Решение задачи компенсации реактивной мощности (РМ) не ограничивается ее установкой. Необходимо комплексно решать следующие вопросы: *обоснованный выбор и расчет:* устройства должны подбираться с учетом как их собственных статических характеристик, так и характерных режимов работы нагрузки предприятия; определение наивыгоднейших точек установки компенсирующих устройств (КУ) в распределительной сети.

2. Регулирование РМ как общая задача для потребителя и энергосистемы

Перетоки реактивной мощности в часы максимума и минимума нагрузки энергосистемы существенно различаются. Это создает взаимную заинтересованность энергоснабжающей организации и потребителя в автоматическом регулировании генерации и потребления РМ в течение суток.

Принципы договорных отношений:

1. Условия по РМ в договоре энергоснабжения должны основываться на конкретных режимах работы энергосистемы и характере нагрузок потребителя.

2. Цель – достичь взаимовыгодного режима, нормализующего перетоки РМ и позволяющего обеим сторонам работать в более экономичных условиях.

3. В договоре должны быть четко определены: графики включения/отключения КУ, порядок оплаты за РМ, методы стимулирования потребителя за рациональную компенсацию (например, скидки с тарифа).

3. Анализ договорных взаимоотношений и типичные ошибки потребителей

Рациональная оплата электроэнергии зависит не только от ее экономического расходования, но и от грамотного построения договорных отношений с энергоснабжающей организацией.

Пренебрежение договорными возможностями ведет к значительным переплатам. Типичные ошибки предприятий:

1. Неиспользование права на снижение оплачиваемой мощности: переплата по основной ставке тарифа. В договор следует включить условие, что снижение мощности (например, на срок от 3 месяцев) учитывается при расчете платы.

2. Учет электроэнергии на стороне НН (0,4 кВ) головного трансформатора: двойная переплата:

1) по повышенной ставке двухставочного тарифа;

2) за завышенные или некорректно рассчитанные потери в трансформаторе. Решение – перенос учета на сторону ВН (6...10 кВ и выше).

3. Отпуск энергии субабонентам без учета их нагрузки в максимуме: оплата всей заявленной мощности без вычета нагрузки субабонентов. Их фактическая нагрузка должна определяться по графикам и фиксироваться в договоре для корректировки оплачиваемой мощности.

4. Превышение согласованного в договоре объема потребления: переплата по повышенным тарифам за сверхлимитное потребление, что формально закреплено договором.)

Пример расчета мощности компенсации реактивной мощности для промышленного предприятия

Рассмотрим конкретный пример для механического цеха, где основная нагрузка – асинхронные электродвигатели.

Исходные данные

Средняя активная мощность за наиболее нагруженную смену (P)	500 кВт
Средний коэффициент мощности ($\cos\varphi_1$) до компенсации	0,75
Целевой коэффициент мощности ($\cos\varphi_2$) после компенсации	0,95
Максимальная мощность (P_{\max})	650 кВт
Напряжение сети	0,4 кВ (400 В)

1. Последовательность расчета

Шаг 1. Определение текущих и целевых значений $\operatorname{tg}\varphi$

$\operatorname{tg}\varphi$ – это отношение реактивной мощности к активной. Он связан с $\cos\varphi$ формулой:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}.$$

Текущий $\operatorname{tg}\varphi_1$ при $\cos\varphi_1 = 0,75$:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - 0,75^2}}{0,75} = \frac{\sqrt{0,4375}}{0,75} = \frac{0,661}{0,75} \approx 0,88.$$

Целевой $\operatorname{tg}\varphi_2$ при $\cos\varphi_2 = 0,95$:

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - 0,95^2}}{0,95} = \frac{\sqrt{0,0975}}{0,95} = \frac{0,312}{0,95} \approx 0,33.$$

Шаг 2. Расчет требуемой мощности компенсации (Q_k)

Формула для определения мощности конденсаторной установки (КУ):

$$Q_k = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2).$$

Для средней мощности ($P = 500$ кВт):

$$Q_{k(\text{cp})} = 500 \cdot (0,88 - 0,33) = 500 \cdot 0,55 = 275 \text{ квар.}$$

Для проверки в максимальном режиме ($P_{\max} = 650$ кВт):

$$Q_{k(\max)} = 650 \cdot 0,55 = 357,5 \text{ квар.}$$

Шаг 3. Выбор номинала компенсирующей установки

Расчетное значение: ~ 275 квар.

Выбрать автоматическую конденсаторную установку (АКУ) номинальной мощностью 300 квар (например, 6 ступеней по 50 квар). Это покроет потребность при средней нагрузке и позволит эффективно компенсировать в режиме максимума (останется некомпенсированными $\sim 57,5$ квар, что допустимо).

2. Проверка результатов

Рассчитаем, какой $\cos\varphi$ будет достигаться с выбранной установкой (300 квар) при максимальной нагрузке.

Реактивная мощность, которую нужно скомпенсировать при максимуме: 357,5 квар.

Установленная мощность АКУ: 300 квар.

Оставшаяся некомпенсированная реактивная мощность:

$$Q_{\text{ост}} = Q_{\text{к(max)}} - Q_{\text{уст}} = 357,5 - 300 = 57,5 \text{ квар.}$$

Новый $\text{tg}\varphi'$ при максимальной нагрузке:

1. Реактивная мощность без компенсации:

$$Q_1 = P_{\text{max}} \cdot \text{tg}\varphi_1 = 650 \cdot 0,88 = 572 \text{ квар.}$$

2. Реактивная мощность после компенсации:

$$Q_2 = Q_1 - Q_{\text{уст}} = 572 - 300 = 272 \text{ квар.}$$

3. Новый $\text{tg}\varphi' = Q_2/P_{\text{max}} = 272/650 \approx 0,418$.

Новый $\cos\varphi'$:

$$\cos\varphi' = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{tg}\varphi')^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,418^2}} = \frac{1}{\sqrt{1,1747}} \approx \frac{1}{1,084} \approx 0,922.$$

Вывод. Установка на 300 квар даже в режиме максимальной нагрузки обеспечит $\cos\varphi' \approx 0,92$, что соответствует нормативным требованиям ($> 0,9$). (6 ступеней \times 50 квар (или 5×60 квар)) с контроллером, измеряющий $\cos\varphi$ в реальном времени и подключающий/отключающий ступени

1.2. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электрическая система представляет собой сложный технический объект, уникальность и сложность управления которым обусловлены совокупностью фундаментальных физических и организационно-технологических особенностей.

Единство и непрерывность процессов генерации, передачи и потребления

Производство электроэнергии в каждый момент времени должно точно соответствовать ее потреблению, так как ее значительное аккумулирование в промышленных масштабах невозможно. Это требует наличия надежной электрической и магнитной связи на всем пути от генератора к приемнику.

Структура электроэнергетической системы (ЭЭС)

Структурно в состав современной энергосистемы входят следующие основные технологические звенья (рис. 1.3):

- *Объекты генерации:* электрические станции различных типов (тепловые, атомные, гидравлические, ветровые, солнечные), включающие основное оборудование (котлы, турбины, генераторы) и системы преобразования энергии (трансформаторы, преобразователи).
- *Электрические сети:* магистральные и распределительные сети различных классов напряжения, обеспечивающие транспортировку электроэнергии.
- *Системы управления и автоматизации:* комплекс технических средств и программного обеспечения для диспетчерского управления, регулирования частоты и мощности, противоаварийной автоматики.
- *Объекты потребления (нагрузки):* совокупность всех электроприемников, подключенных к системе.

Фактическое организационное разделение на отдельные предприятия (генерирующие, сетевые, сбытовые) отражает этапы единого технологического процесса и сложившуюся структуру собственности в отрасли, но не отменяет их физической и режимной взаимозависимости в рамках единой ЭЭС.

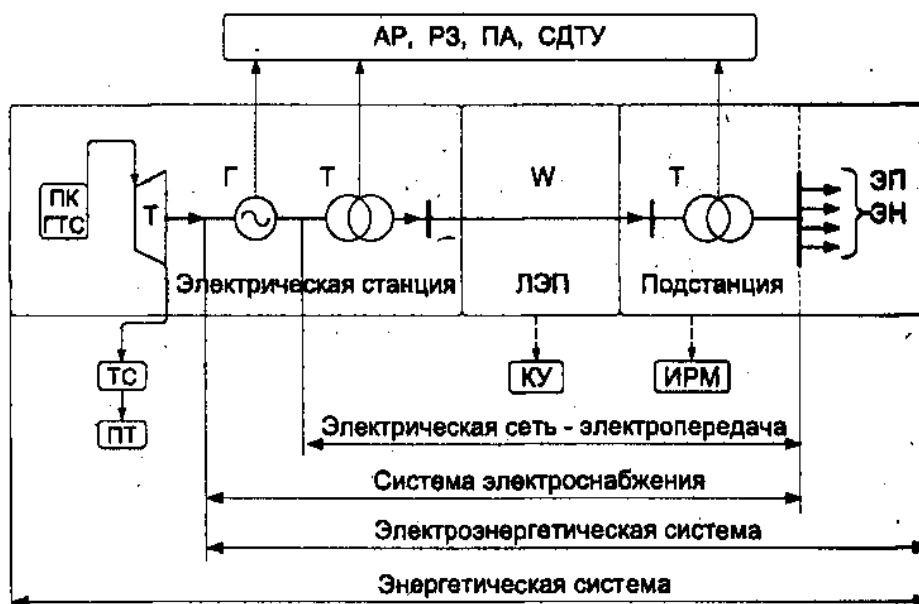


Рис. 1.3. Структурная схема электроэнергетической системы

1. Основные понятия (от общего к частному)

Для понимания структуры энергетики важно различать следующие иерархические понятия:

- *Энергетическая система (энергосистема)* – самый высокий уровень. Это единый производственно-технологический комплекс, включающий все электростанции, электрические и тепловые сети, а также потребителей, связанных общностью режима и находящихся под единым диспетчерским управлением.

- *Электрическая система* – часть энергосистемы, которая включает только объекты, связанные с электроэнергией. В ее состав входят:

- электрические части электростанций (генераторы, трансформаторы);
- электрические сети (линии электропередачи, подстанции);
- потребители электрической энергии.

- *Система электроснабжения* – комплекс электроустановок (подстанций, кабелей, распределительных щитов), предназначенный для снабжения электроэнергией конкретного потребителя (завода, города, микрорайона).

Элементы электроэнергетических систем показаны в табл. 1.4.

1.4. Элементы электроэнергетических систем

Элемент	Определение и назначение
Электростанция	Предприятие для производства (генерации) электроэнергии. Классификация по типу первичного энергоресурса: <ul style="list-style-type: none">– ТЭС (тепловые) – на органическом топливе (газ, уголь, мазут);– АЭС (атомные) – на ядерном топливе;– ГЭС (гидроэлектростанции) – на энергии падающей воды;– ВЭС, СЭС (ветровые, солнечные) – на возобновляемых источниках (ВИЭ)

Элемент	Определение и назначение
Электрическая сеть	Совокупность установок для передачи и распределения электроэнергии. Состоит из подстанций (ПС) и линий электропередачи (ЛЭП)
Подстанция (ПС)	Электроустановка для преобразования напряжения (трансформация) и распределения энергии. Ключевой элемент ПС – распределительное устройство (РУ)
Распределительное устройство (РУ)	Узел на подстанции для приема и распределения энергии. Содержит: – сборные шины – проводники для связи всех присоединений; – коммутационные аппараты (выключатели, разъединители); – устройства релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА)
Линия электропередачи (ЛЭП)	Устройство для транспортировки электроэнергии. Два основных типа: – воздушная ЛЭП (ВЛ): Провода на опорах в открытом воздухе; – кабельная ЛЭП (КЛ): Изолированные проводники, проложенные в земле или каналах
Электроприемник (ЭП)	Устройство, преобразующее электроэнергию в другой вид энергии (свет, тепло, механическое движение)
Потребитель электрической энергии	Юридическое или физическое лицо, совокупность электроприемников, объединенных технологическим процессом и территориально

3. Межсистемные связи и управление режимами

• *Межсистемные связи* – это высоковольтные линии электропередачи (220, 330, 500 кВ и выше), которые связывают отдельные энергосистемы в Единую энергосистему (ЕЭС) страны. Это позволяет:

- повысить надежность электроснабжения;
- оптимизировать загрузку электростанций;
- оказывать взаимную помощь при авариях.

- *Управление потоками мощности* – критически важная задача. Каждая энергосистема контролирует обменную (сальдовую) мощность – разницу между мощностью, отданной в соседние системы, и принятой от них.

- если система отдает больше, чем принимает – она является генерирующей;

- если принимает больше – потребляющей.

- Для автоматического регулирования и ограничения потоков используются *технические средства телемеханики* (телеметрия, телесигнализация, телеуправление), которые передают информацию о токах и мощности на диспетчерские пункты для формирования управляющих воздействий.

Принципиальная электрическая схема электроэнергетической системы показана на рис. 1.4.

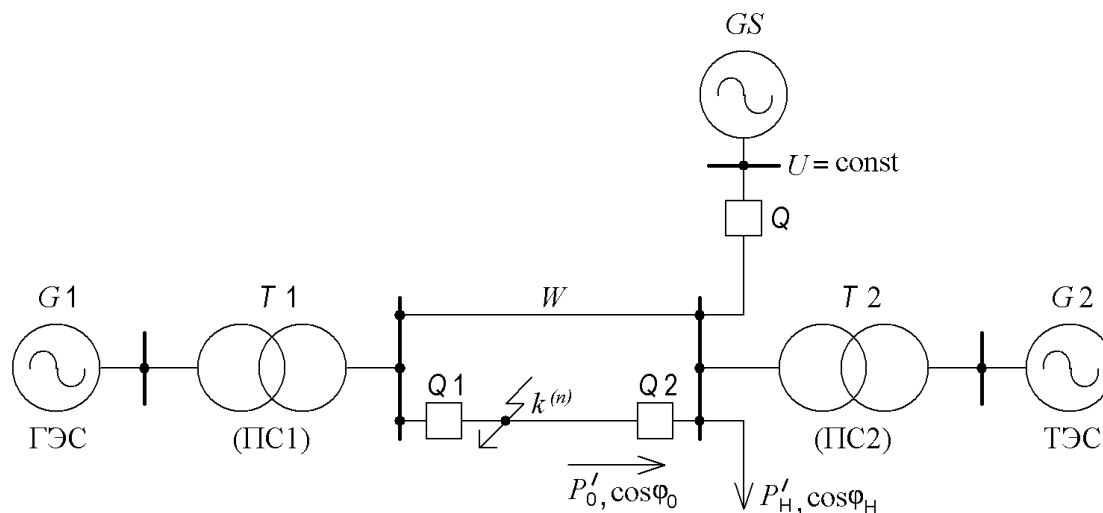


Рис. 1.4. Принципиальная электрическая схема электроэнергетической системы

Основные элементы воздушных линий (ВЛ)

Конструктивно воздушная линия представляет собой сложное инженерное сооружение (рис. 1.5), состоящее из следующих ключевых компонентов:

1. *Опоры.* Несущие конструкции, воспринимающие механические нагрузки от проводов, тросов, внешних воздействий (ветер, гололед). Различаются по материалу (деревянные, металлические, железобетонные, композитные), назначению (промежуточные, анкерные, угловые, концевые) и способу установки (свободностоящие, на оттяжках).



Рис. 1.5. ВЭЛ и оборудование, которое размещается на ВЭЛ

2. *Провода.* Токоведущие элементы, предназначенные для передачи электроэнергии. Изготавливаются из алюминия (А, АС), его сплавов (АЖ) или комбинации со стальным сердечником для увеличения механической прочности (АС, ПС).

3. *Грозозащитные тросы.* Проводники, расположенные выше проводов и заземленные на каждой опоре. Предназначены для защиты ВЛ от прямых ударов молнии.

4. *Изоляторы.* Устройства для электрической изоляции и механического крепления проводов и тросов к опорам. Основные типы: штыревые (для ВЛ до 35 кВ), подвесные тарельчатые (для ВЛ 110 кВ и выше) и полимерные (современная альтернатива стеклянным и фарфоровым).

5. *Линейная арматура.* Совокупность металлических деталей для соединения проводов и тросов (зажимы натяжные и поддерживающие, соединители), их крепления к изоляторам, а также для монтажа изоляторов на опорах.

6. *Грозозащита и заземление.* Система, включающая тросы, разрядники, ОПН (ограничители перенапряжений нелинейные) и заземляющие устройства опор для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений.

7. *Маркировочные и вспомогательные устройства.* Габаритные сигнальные шары, птицевозрастные устройства, противоветровые гасители вибрации (спирали, демпферы).

Классификация и конструктивные параметры ВЛ

По количеству независимых трехфазных систем ВЛ делятся на:

- *Одноцепные*: на опорах расположены три провода (фазы) одной линии, могут присутствовать тросы.
- *Двухцепные и многоцепные*: на одной опоре размещены провода двух или более независимых трехфазных линий, что повышает плотность передачи мощности с единицы площади отчуждения земли.

Основные конструктивные параметры, определяющие механический расчет ВЛ:

- *длина пролета (L)* – горизонтальное расстояние между центрами двух соседних опор.
- *стрела провеса (f)* – максимальное вертикальное расстояние от прямой, соединяющей точки подвеса провода на смежных опорах, до низшей точки провода в пролете. Зависит от нагрузки на провод, температуры и длины пролета.
- *габарит линии (h)* – наименьшее допустимое расстояние от низшей точки провеса провода (в пролете или у опоры) до поверхности земли или пересекаемых объектов. Нормируется ПУЭ для обеспечения безопасности.

Кабельные линии (КЛ)

КЛ – это линия для передачи электроэнергии, выполненная одним или несколькими параллельными кабелями, уложенными непосредственно в землю (траншею), кабельные сооружения (коллекторы, тоннели, каналы) или по конструкциям, с установленными соединительными, стопорными и концевыми муфтами.

Конструкция кабеля включает:

1. *Токопроводящую жилу* (одну или несколько) из меди или алюминия.
2. *Изоляцию жил* (из сшитого полиэтилена, ПВХ, бумажно-масляной пропитанной).
3. *Герметичные оболочки* (из алюминия, свинца, полимеров) для защиты от влаги и механических воздействий.

4. *Защитный слой* (броня из стальных лент или оцинкованных проволок, наружный полимерный шланг).

В таблице 1.5 показан сравнительный анализ ВЛ и КЛ.

Современные тенденции:

- Для ВЛ – применение самонесущих изолированных проводов (СИП) в распределительных сетях 0,4...20 кВ, повышающих надежность.
- Для КЛ – переход на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE) вместо бумажно-масляной, что упрощает монтаж и эксплуатацию.
- Активное развитие технологий мониторинга состояния (PD, DTS) как для ВЛ (тепловизоры, дроны), так и для КЛ, для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию.

1.5. Сравнительный анализ ВЛ и КЛ

Параметр	Воздушная линия (ВЛ)	Кабельная линия (КЛ)
Стоимость	Значительно ниже, особенно на напряжении 110 кВ и выше	В 3 – 10 раз дороже ВЛ аналогичного напряжения и пропускной способности
Пропускная способность	Выше при равном сечении провода/жилы благодаря лучшему охлаждению воздухом	Ограничена тепловым режимом изоляции и условиями прокладки, требуется точный тепловой расчет
Надежность	Зависит от атмосферных воздействий (гололед, ветер, гроза)	Выше в условиях агрессивной среды, в плотной городской застройке, менее подвержена внешним воздействиям
Эксплуатация	Простота визуального контроля состояния, но требуется регулярная трассировка просек	Сложность локализации повреждений, необходимость специализированного оборудования для диагностики (частичные разряды, термография)
Область применения	Преимущественно за пределами плотной городской застройки, магистральные линии	Города, промышленные зоны, переходы через водные преграды, морские участки, где использование ВЛ технически невозможно или недопустимо по градостроительным нормам

Трансформация, распределение и преобразование энергии

1. *Повышающие (питающие) подстанции* – электроустановки, расположенные в непосредственной близости от электростанций (ТЭС, ГЭС, АЭС, ВЭС). Их основная функция – преобразование выработанной электроэнергии (обычно на напряжении 6...24 кВ) до высокого и сверхвысокого класса напряжения (110, 220, 330, 500, 750 кВ) для эффективной передачи на большие расстояния с минимальными потерями.

2. *Понижающие (приемные) подстанции* – электроустановки, расположенные в центрах потребления (города, промышленные районы). Они выполняют многоступенчатую трансформацию высокого напряжения до среднего (6...35 кВ) и низкого (0,4 кВ) уровня для распределения между конечными потребителями. Подстанция может выполнять одновременно функции узловой и распределительной.

3. *Сборные шины (шинопроводы)* – ключевые элементы распределительных устройств (РУ) подстанций, представляющие собой системы жестко закрепленных проводников (шин) на изоляторах. Они служат для связи и коммутации между собой различных вводов (линий, трансформаторов) и отходящих присоединений, обеспечивая гибкость схемы и возможность резервирования.

4. *Распределительный пункт (РП)* – электроустановка среднего напряжения (6...35 кВ), предназначенная для приема и распределения электроэнергии между несколькими трансформаторными пунктами или крупными потребителями без трансформации напряжения. Оснащена коммутационной и защитной аппаратурой.

5. *Трансформаторный пункт (ТП) / Подстанция (ПС)* – конечное звено в цепи передачи, выполняющее трансформацию со среднего (6...10 кВ) на низкое (0,4 кВ) напряжение и распределение электроэнергии непосредственно между группами потребителей (жилые дома, офисные здания, цеха). Современные ТП/ПС часто представляют собой комплектные трансформаторные подстанции (КТП) блочного или мачтового типа.

Потребители, нагрузки и система электроснабжения

6. *Электроприемник (ЭП)* – устройство, аппарат или механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии (механическую, тепловую, световую, химическую). Примеры: электродвигатель, ТЭН, люминесцентный светильник, зарядное устройство.

7. *Потребитель электроэнергии* – технологически или территориально объединенная группа электроприемников, а также юридическое или физическое лицо, осуществляющее потребление.

8. *Электрическая нагрузка* – совокупность мощности (токов) всех электроприемников, присоединенных к шинам конкретного узла системы электроснабжения (ПС, ТП, РП). Это динамическая величина, изменяющаяся во времени. Управление графиком нагрузки – ключевая задача для оптимизации работы энергосистемы.

9. *Система электроснабжения (СЭС) города/предприятия* – комплекс взаимосвязанных энергетических объектов, предназначенных для надежного обеспечения электроэнергией всех потребителей на определенной территории. Она включает в себя внешние и внутренние сети, распределительные устройства, трансформаторные подстанции, системы управления и защиты. Структура энергопотребления в современных мегаполисах характеризуется высокой долей коммерческого сектора и бытового потребления.

Пример структуры электропотребления:

- промышленность: ~40...50%;
- коммерческий сектор и сфера услуг: ~25...30%;
- население (бытовые потребители): ~20...25%;
- электротранспорт (метро, трамваи, зарядная инфраструктура): ~3...7%;
- прочее (уличное освещение, системы жизнеобеспечения): ~2...5%.

Потребителей электрической энергии необходимо классифицировать, что позволяет более эффективно использовать энергетические ресурсы (таб. 1.6).

1.6. Классификация потребителей ЖКХ

Группа потребителей	Характер нагрузки	Фазность	Режим работы	Коэффициент мощности (cosφ)
Лифты	Силовая, реактивная, с большими пусковыми токами	Трехфазная (380 В)	Повторно-кратковременный (ПВ = 15...40%)	Низкий (0,5...0,7 без компенсации)
Холодильники/морозильники	Активно-индуктивная, пусковые токи	Однофазная (220 В)	Длительный с периодическими включениями	Средний (0,6...0,8)
Кондиционеры (компрессорные)	Силовая, реактивная, высокие пусковые токи	Однофазная/трехфазная	Повторно-кратковременный (летний период)	Низкий (0,5...0,75)
Освещение (уличное)	Активная	Трехфазная (380 В)	Длительный (ночной период)	Высокий (0,95...1,0)
Освещение (квартирное)	Активная/емкостная (светодиодное)	Однофазная (220 В)	Прерывистый (вечерний пик)	0,9...1,0 (с коррекцией)
Насосное оборудование	Силовая, реактивная	Трехфазная	Длительный/повторно-кратковременный	Низкий (0,6...0,8)

Режимы работы электроэнергетических систем

Установившийся (стационарный) режим – состояние системы, при котором токи, напряжения и мощности во всех элементах остаются постоянными или меняются циклически в течение рассматриваемого интервала времени. Для трехфазных систем предполагается симметрия по фазам. Это основной расчетный режим.

Нормальный режим – установившийся режим, при котором все элементы системы работают в штатном состоянии, с параметрами (напряжением, частотой), соответствующими нормам, и обеспечивают надежное электроснабжение потребителей. Именно для этого режима проводятся основные технико-экономические расчеты.

Переходный (динамический) режим – процесс перехода системы из одного установившегося состояния в другое, вызванный коммутациями, короткими замыканиями, резкими изменениями нагрузки. Длится от миллисекунд до десятков секунд и сопровождается сложными электромеханическими и электромагнитными процессами.

Современная энергосистема: определение, структура и преимущества интеграции

Энергосистема (ЭС) – это сложная технико-экономическая система, представляющая собой единый производственно-технологический комплекс. В ее состав входят генерирующие станции различного типа (тепловые, атомные, гидравлические, ветровые, солнечные), объединенные электрические и тепловые сети, а также все потребители электро- и теплоэнергии, связанные общностью режима и находящиеся под единым оперативно-диспетчерским управлением.

Преимущества объединения электроэнергетических систем

Создание крупных объединенных энергосистем путем параллельной работы нескольких ЭЭС является стратегическим направлением развития энергетики и обеспечивает существенные преимущества по сравнению с работой изолированных систем:

Аспекты улучшения взаимодействия потребителей и поставщиков показаны в табл. 1.7.

Современные объединенные энергосистемы сталкиваются с новыми задачами:

- *Интеграция нестабильной ВИЭ-генерации* (ветер, солнце), требующая развития систем накопления энергии и повышения маневренности традиционных станций.
- *Цифровизация и создание «Smart Grid»* – внедрение интеллектуальных систем управления, контроля и защиты для повышения гибкости и наблюдаемости сети.
- *Повышение кибербезопасности* критически важной инфраструктуры.

1.7. Аспекты улучшения взаимодействия потребителей и поставщиков

Преимущество	Сущность и экономический эффект
1. Повышение надежности и устойчивости	Наличие множества параллельных генерирующих источников и сетевых связей позволяет компенсировать внезапный выход из строя крупных агрегатов или линий электропередачи. Объединенная система обладает большей инерционностью и устойчивостью к возмущениям
2. Эффект совмещения графиков нагрузки	Максимумы потребления в разных регионах и часовых поясах наступают в разное время («несовпадение максимумов»). Это позволяет снизить суммарную пиковую нагрузку объединения, что уменьшает потребность в установленной генерирующей мощности
3. Оптимизация использования топливно-энергетических ресурсов	Становится возможной экономически и экологически оптимальная диспетчеризация генерации: базовую нагрузку несут самые эффективные АЭС и ГЭС, полупиковую – современные ТЭС, а пиковую – маневренные ГАЭС или ГТУ. Это ведет к снижению удельного расхода топлива
4. Возможность внедрения высокоэффективных крупных агрегатов	Крупные энергоблоки (1000...1200 МВт и более) имеют более высокий КПД, но их установка в малых изолированных системах невозможна из-за соизмеримости их мощности с нагрузкой всей системы. В объединенной сети такие блоки могут быть безопасно введены в работу

Классификация электрических сетей по функциональному назначению

Электрические сети образуют четкую иерархическую структуру, где каждый уровень оптимизирован под свои задачи (табл. 1.8).

Современные тенденции развития

1. *Интеллектуализация («Smart Grid»)*: внедрение цифровых подстанций, систем автоматического повторного включения (АПВ), устройств реклоузуров и интеллектуальных систем учета (АИИС КУЭ) для самодиагностики и самовосстановления сети.

2. *Интеграция распределенной генерации (ВИЭ)*: сети 6...35 кВ превращаются из пассивных распределительных в активные управляемые системы, принимающие мощность от солнечных электростанций и ветропарков.

1.8. Иерархическая структура электрических сетей

Класс сети	Основное назначение и функции	Характерные напряжения	Примеры и особенности
1. Системообразующие (магистральные) сети	Объединение крупных электростанций и энергосистем в Единую энергетическую систему (ЕЭС) страны, обеспечение дальних потоков мощности, формирование каркаса энергетики	Сверхвысокое (СВН): 330, 500, 750 кВ, 1150 кВ (переменный ток); ±400, ±500, ±800 кВ (постоянный ток для ЛЭП постоянного тока – ЛЭП ПТ)	Межгосударственные и межсистемные связи. Магистральные линии от АЭС и крупных ГЭС. Высокая пропускная способность, повышенные требования к устойчивости и надежности
2. Питающие (распределительные сети высокого напряжения)	Транспортировка больших потоков энергии от узлов системообразующей сети или от шин крупных электростанций к центрам нагрузки – крупным городам и промышленным районам	Высокое (ВН): 110, 150, 220 кВ	Связь между системными подстанциями 500/220 кВ и узловыми подстанциями городов (110/10 кВ). Часто выполняются по кольцевой схеме для повышения надежности
3. Распределительные сети среднего и низкого напряжения	Непосредственное распределение электроэнергии между множеством конечных потребителей (жилые дома, предприятия, инфраструктура)	Среднее (СН): 6, 10, 20, 35 кВ. Низкое (НН): 0,4 кВ (380/220 В)	Городские и сельские сети: питание жилых кварталов, общественных зданий. Сети промышленных предприятий: питание цехов и технологических установок. Характерна разветвленная радиальная или магистральная схема

3. *Повышение надежности*: широкое применение кольцевых схем с секционированием в сетях 6...10 кВ, использование кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в городах.

4. *Развитие распределительных сетей 20...35 кВ*: переход на более высокий класс напряжения для распределения позволяет увеличить пропускную способность и снизить потери.

Таким образом, современная электрическая сеть – это не просто набор проводов и подстанций, а сложная, многоуровневая и активно цифровизируемая система, обеспечивающая надежное и экономичное электроснабжение всех отраслей экономики.

Классификация электрических сетей по номинальному напряжению

*Стандартные напряжения электрических сетей переменного тока:
иерархия и области применения*

Номинальные напряжения электрических сетей стандартизированы и образуют единый иерархический ряд, который определяет архитектуру всей электроэнергетики от генерации до розетки в квартире. Этот ряд построен по принципу увеличения напряжения для передачи большей мощности на большие расстояния с меньшими потерями.

Основные принципы классификации и обозначения

Система напряжений до 1000 В (НН): обозначается двойной дробью 380/220 В. Числитель – линейное (междуфазное) напряжение, знаменатель – фазное напряжение (между фазой и нейтралью). Это соотношение ($\sqrt{3}$) характерно для трехфазной четырехпроводной системы.

Система напряжений выше 1000 В (СН, ВН, СВН): указывается только линейное напряжение (например, 10, 110 кВ).

Исторические напряжения: ряды 220/127 В, 3 и 150 кВ являются устаревшими и не используются при новом проектировании.

Иерархия напряжений и их сферы применения

В таблице 1.9 представлена полная картина с примерами использования каждого класса напряжения.

1.9. Иерархия напряжений и их сферы применения

Категория сети	Стандартные напряжения	Области применения и примеры
Сверхвысокое напряжение (СВН) (Магистральные сети)	1150, 750, 500, 330 кВ	Системообразующие сети: создание каркаса Единой энергосистемы (ЕЭС), объединение энергообъединений, дальние перетоки мощности (тысячи км). Примеры: ЛЭП «Сибирь-Центр» (1150 кВ), межсистемные связи между Европейской и Объединенной энергосистемами России (750/500 кВ). Выдача мощности крупнейших электростанций: Саяно-Шушенская ГЭС, Балаковская АЭС (500 кВ)

Категория сети	Стандартные напряжения	Области применения и примеры
<p>Высокое напряжение (ВН) (Питающие и распределительные сети)</p>	<p>220, 110, (35) кВ</p>	<p>Питающие сети: транспортировка энергии от системообразующих узлов к центрам нагрузки – крупным городам и пром-районам. Примеры: Кольца 110 кВ вокруг Москвы для питания районных подстанций, вводы на крупные металлургические комбинаты (220 кВ). Распределительные сети: в густонаселенных регионах 35 кВ используется как первое ступень распределения</p>
<p>Среднее напряжение (СН) (Распределительные сети)</p>	<p>20, 10, 6 кВ</p>	<p>Распределение внутри городов, промзон, сельской местности. Напряжение питания для крупных потребителей и трансформаторных подстанций 10/0.4 кВ. Современный тренд: 10 кВ – основной стандарт для новых сетей (меньшие потери, большая дальность). 6 кВ – применяется в «наследственных» сетях старых промышленных предприятий (заводы с шестикиловольтными двигателями). 20 кВ – перспективное, но пока малораспространенное напряжение для снижения потерь в протяженных сельских сетях (например, опыт внедрения в Татарстане)</p>
<p>Низкое напряжение (НН) (Сети конечного потребления)</p>	<p>660/380, 380/220 В</p>	<p>380/220 В – универсальный стандарт: электроснабжение жилых, общественных и большинства промышленных зданий. От этой сети работают розетки, освещение, лифты, офисное оборудование. 660/380 В – промышленный стандарт: применяется для питания мощных электродвигателей на крупных производствах (шахтные подъемники, насосные станции, вентиляторы главного проветривания), что позволяет уменьшить сечение питающих кабелей</p>

Последовательность использования напряжений – путь электроэнергии от станции к потребителю на примере (рис. 1.6).

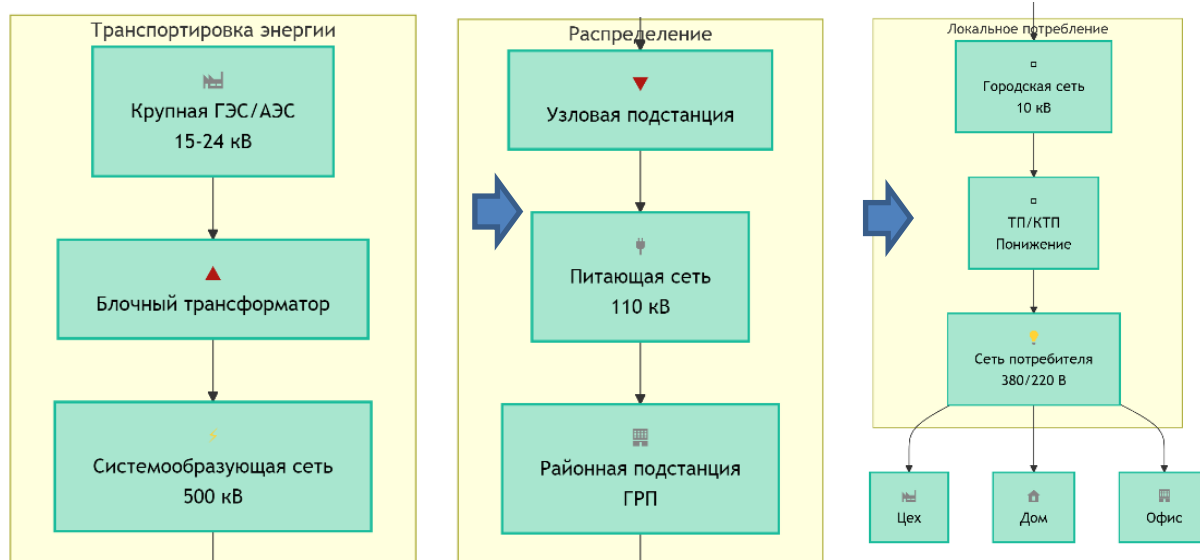


Рис. 1.6. Последовательность использования напряжений

Современные тренды и перспективы развития ЭС

Унификация и отказ от 6 кВ: постепенный вывод из эксплуатации сетей 6 кВ в пользу 10...20 кВ. Новые промышленные объекты проектируются на 10 кВ.

Развитие уровня 20...35 кВ: активное внедрение 20 кВ для сокращения числа подстанций и снижения потерь в сельской местности и новых микрорайонах.

Прямое подключение крупных потребителей: современные центры обработки данных (ЦОД) или электролизные заводы («зеленый» водород) могут подключаться напрямую к сетям 110...220 кВ, без ступеней трансформации.

Интеграция ВИЭ: солнечные и ветровые электростанции промышленного масштаба обычно выдают мощность в сети 35 кВ, которые через повышающие подстанции соединяются с сетями 110...220 кВ.

На рисунке 1.7 показана конфигурация ветрогенератора.

Вторая классификация турбин, частично зависимых, может быть разделена следующим образом: роторное сопротивление и асинхронный генератор с двойным питанием (DFIG).

В отличие от классических вращающихся машин, линейный генератор осуществляет прямые возвратно-поступательные движения рабочего органа (штока с постоянными магнитами) внутри статора (катушки индуктивности), генерируя электрический ток. Такая конструкция (рис. 1.8) позволяет исключить из кинематической цепи вращательные элементы и механические редукторы, напрямую соединяя шток генератора с ветроколесом через кривошипно-шатунный или иной механизм преобразования вращения в линейное движение.

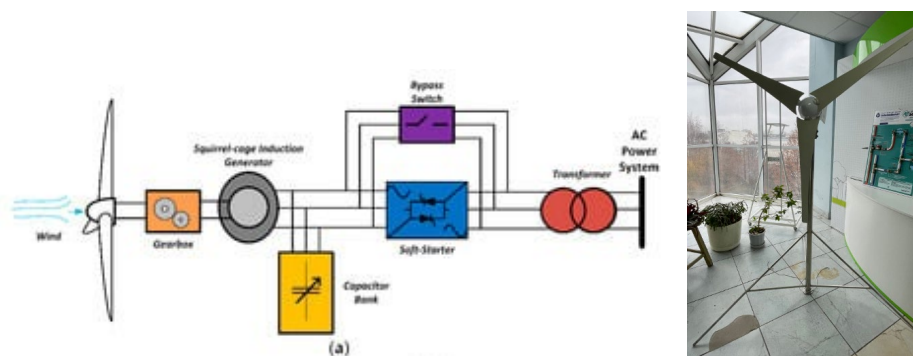


Рис. 1.7. Конфигурация ветрогенератора

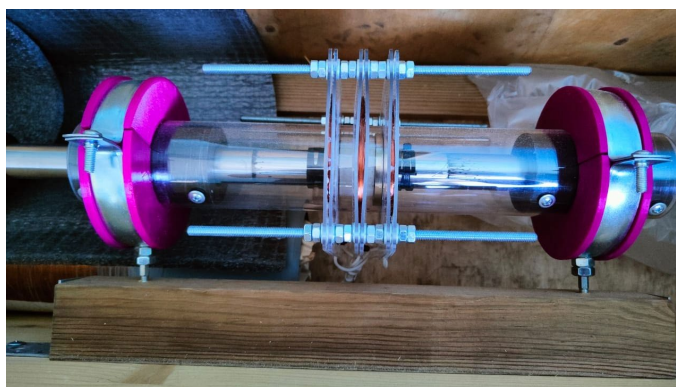


Рис. 1.8. Конструктивная схема линейного электрогенератора:

- 1 – корпус статора; 2 – обмотка (катушка); 3 – подвижный шток;
- 4 – постоянные магниты; 5 – подшипниковые узлы

Солнечные инверторы: мост между фотоэлектрическими батареями и сетью переменного тока

Солнечные инверторы (фотоэлектрические инверторы) (табл. 1.10) – это силовые электронные аппараты, выполняющие ключевую функцию в солнечных электростанциях: преобразование постоянного тока (DC), генерируемого

фотоэлектрическими (PV) батареями, в переменный ток (AC) с параметрами, необходимыми для подачи в общую энергосистему или для питания локальных нагрузок.

1.10. Основные типы инверторов по топологии преобразования

Тип инвертора	Структура и путь преобразования	Ключевые особенности и применение
Одноступенчатый инвертор	PV → Инвертор (DC/AC) → Сеть	Прямое преобразование. Простая конструкция, но меньше возможностей для оптимизации работы PV-панелей (например, поиска точки максимальной мощности – MPPT). Чаще используется в малых системах
Двухступенчатый инвертор	PV → Преобразователь DC/DC → Инвертор DC/AC → Сеть	Две ступени дают больше гибкости. На первом этапе DC/DC-преобразователь повышает напряжение и обеспечивает постоянный поиск точки максимальной мощности (MPPT) для каждого модуля или стринга. Это позволяет увеличить общую выработку энергии, особенно при частичном затенении или разных углах наклона панелей

Современные функции и тенденции

Современные солнечные инверторы – это интеллектуальные устройства, выполняющие не только простое преобразование тока. Их ключевые дополнительные функции:

- *Синхронизация с сетью*: точное соответствие напряжения, частоты и фазы сетевому току.
- *Мониторинг и диагностика*: удаленный контроль выработки и состояния системы.
- *Защита сети*: автоматическое отключение при исчезновении сетевого напряжения (защита от «островного режима»).

- *Управление энергией:* в гибридных системах – управление потоком энергии между PV-панелями, аккумуляторами, сетью и нагрузками.

Выбор архитектуры солнечного инвертора является ключевым технико-экономическим решением при проектировании станции. Он определяется масштабом системы, условиями размещения панелей (затенение, разные крыши), требованиями к надежности и бюджетом. Тренд смещается в сторону распределенных решений (микроинверторы, оптимизаторы), которые максимизируют выработку в сложных условиях, хотя центральные и стринговые инверторы остаются оптимальным выбором для крупных, однородных и открытых солнечных парков (рис. 1.9).

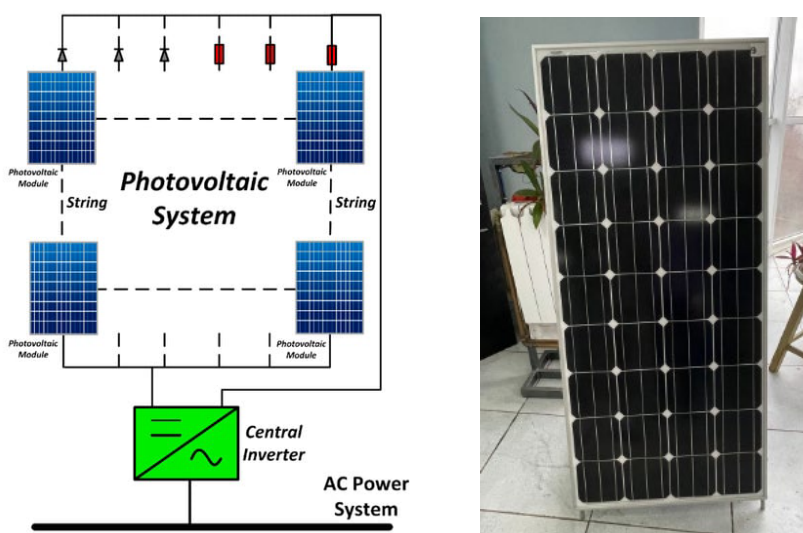


Рис. 1.9. Конфигурация центрального солнечного инвертора

Классификация электрических сетей по конфигурации

1. Разомкнутые сети (радиальные)

- *Определение:* сеть, которая не содержит замкнутых контуров. Исключением являются лишь контуры, образуемые разными фазами или фазой и нулевым проводником.

- *Принцип питания:* все потребители в такой сети получают электроэнергию только с одной стороны – от единственного источника питания по последовательной цепочке.

- *Применение:* распределительные сети в сельской местности, сети электроснабжения небольших населенных пунктов, ответвления к отдельным потребителям.

2. Замкнутые сети

- *Определение:* сеть, содержащая хотя бы один замкнутый контур. Это позволяет потребителям внутри контура получать питание с двух или более сторон.

- *Принцип работы:* наличие альтернативных путей для протекания тока. В нормальном режиме сеть может работать с разомкнутой точкой в контуре для упрощения защиты, а при аварии на одном участке этот участок отключается, и питание потребителей продолжается по обходному пути.

- *Классификация:*

- простые замкнутые сети: содержат только один контур. Пример: кольцевая линия, питающая несколько трансформаторных подстанций;

- сложнозамкнутые сети: Содержат два и более контуров, образующих сетку. Пример: сети крупных городов и промышленных предприятий, где подстанции связаны между собой множеством линий.

- *Применение:* городские распределительные сети (6...10 кВ), сети электроснабжения крупных промышленных предприятий, магистральные сети.

Выбор конфигурации сети является компромиссом между требованиями к надежности электроснабжения и экономическими затратами. Разомкнутые сети экономичны и просты, но ненадежны. Замкнутые сети, особенно сложнозамкнутые, обеспечивают высокую надежность за счет усложнения и удорожания системы.

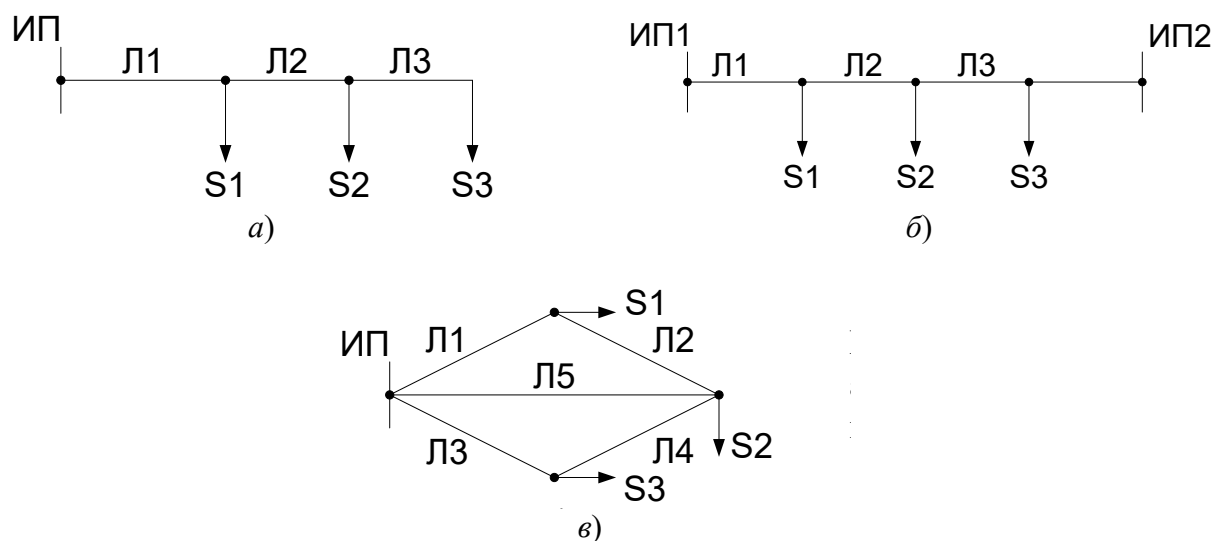


Рис. 1.10. Сети с различной конфигурацией:

а – разомкнутая сеть; б – простая замкнутая сеть; в – сложнозамкнутая сеть

Основные виды схем замещения линий электропередачи

В общем случае линию электропередачи можно представить в виде П-образной схемы замещения четырехполюсника (рис. 1.11).

Ветвь схемы замещения, по которой протекает ток нагрузки, называется продольной. Она включает в себя активное сопротивление $R_{л}$ и индуктивное $X_{л}$. Ветви, включенные на полное напряжение сети, называются поперечными. Они состоят из емкостной и активной проводимостей $B_{л}$ и $G_{л}$.

Величины $R_{л}$, $X_{л}$, $B_{л}$ и $G_{л}$ определяются по упрощенным формулам:

$$R_{л} = r_0 l / n_{ц}, \quad X_{л} = x_0 l / n_{ц}, \quad B_{л} = b_0 l n_{ц} / 2, \quad G_{л} = g_0 l n_{ц} / 2,$$

где l – длина линии, км; r_0 , x_0 , b_0 и g_0 – погонные параметры линии, т.е. сопротивления и проводимости, приходящиеся на единицу длины, Ом/км и См/км; $n_{ц}$ – число цепей линии.

Если номинальное напряжение не превышает 330 кВ, то потери на коронный разряд незначительны. Поэтому в линиях 330 кВ и ниже активную проводимость можно не учитывать.

Принцип гашения электрической дуги постоянного тока и методы экспериментального исследования

Физический принцип гашения дуги постоянного тока

Принцип гашения заключается в целенаправленном изменении этого баланса. Если вольт-амперная характеристика дуги поднимается (например, за счет ее интенсивного охлаждения, растяжения или деионизации дугогасительной решеткой), то точка стабильного горения исчезает. При этом напряжение, требуемое для поддержания дуги $U_{дуги(I)}$, становится больше, чем напряжение, которое может обеспечить цепь $U_{ист} - I_{дуги} R_{цепи}$. В результате баланс нарушается, ток стремится к нулю, и дуга гаснет (табл. 1.11).

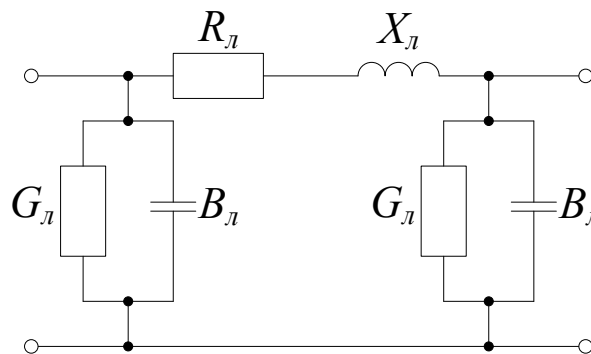


Рис. 1.11. П-образная схема замещения четырехполюсника

1.11. Области вольт-амперной характеристики электрической дуги

Область ВАХ	Физический процесс	Зависимость напряжения от тока
I. Область зажигания (восходящая ветвь)	Несамостоятельный разряд. Требуется внешний ионизатор (высокое напряжение пробоя). После зажигания резко падает напряжение, необходимое для поддержания тока	Падающая характеристика: при росте тока напряжение резко снижается (участок OA)
II. Область нормального горения	Самостоятельная дуга. Основные процессы: термоэлектронная эмиссия с катода, ударная ионизация в столбе. Процессы ионизации и деионизации сбалансированы	Слабовозрастающая, почти горизонтальная характеристика. Напряжение слабо зависит от тока (участок AB)
III. Область интенсивного горения	Интенсивные процессы. Сильный нагрев столба дуги, рост давления, повышение теплопроводности. Требуется больше энергии для поддержания ионизации	Возрастающая характеристика. Напряжение растет с увеличением тока (участок BC)

Падающий характер на начальном участке – главная отличительная черта ВАХ дуги. Это означает, что для ее устойчивого горения источник питания должен иметь специальную нагрузочную характеристику.

Восходящий характер на участке интенсивного горения – ключ к гашению дуги. Если с помощью дугогасительной камеры (охлаждение, растяжение) удастся перевести дугу в эту область, напряжение на ней возрастает и может превысить напряжение источника, что приводит к гашению.

Статическая и динамическая ВАХ. На практике различают *статическую* ВАХ (снятую при медленном изменении тока) и *динамическую* (отражающую мгновенные изменения в процессе гашения). Для расчетов аппаратов важнее динамическая характеристика. Это понимание лежит в основе проектирования всех дугогасительных устройств – от автоматических выключателей до сварочных аппаратов. Если вас интересуют ВАХ дуги в конкретном устройстве (например, в вакуумном дугогасителе), я могу дать более детализированное описание.

Уравнение отключаемой цепи имеет вид:

$$U = iR + U_d + Ldi/dt.$$

При устойчивом горении дуги, когда ток не изменяется, уравнение

$$U = iR + U_{\text{д}}.$$

Согласно рис. 1.12, КВЛ используется для получения:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + U_{\text{arc}}.$$

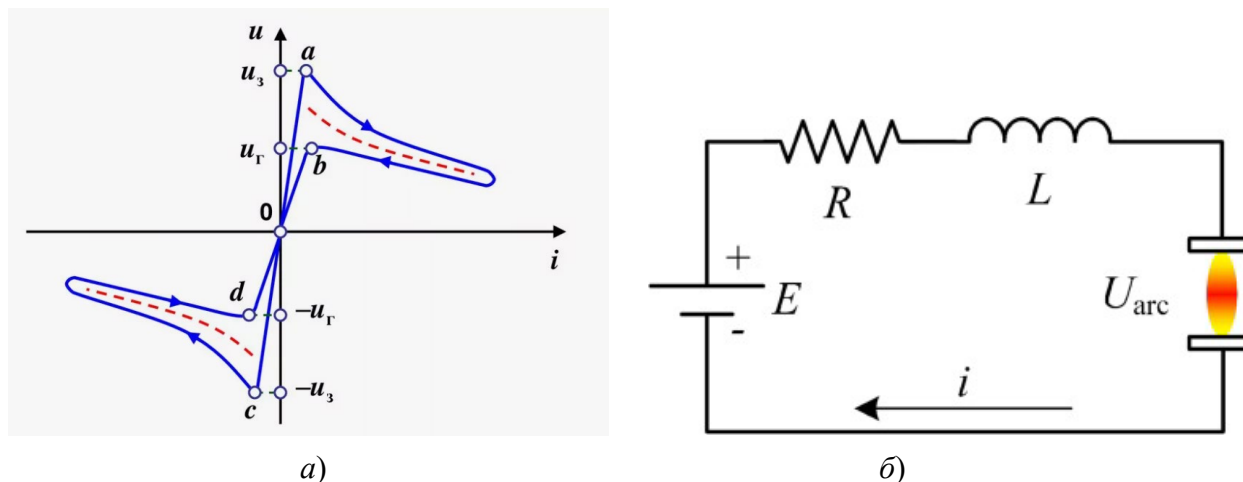


Рис. 1.12:

a – ВАХ электрической дуги; b – схема с параметрами возникновения электрической дуги

Физические процессы горения электрической дуги

Горение электрической дуги – это сложный электрофизический процесс, поддерживаемый несколькими механизмами генерации свободных носителей заряда (электронов и ионов):

1. *Термоэлектронная эмиссия* – испускание электронов с раскаленной поверхности контакта (катода) под действием высокой температуры.

2. *Автоэлектронная (полевая) эмиссия* – «вырывание» электронов с поверхности катода сильным электрическим полем, даже без ее значительного нагрева.

3. *Ионизация толчком (ударная ионизация)* – основной процесс в столбе дуги, когда ускоренные в электрическом поле электроны сталкиваются с нейтральными атомами газа, выбивая из них новые электроны и создавая лавину заряженных частиц.

4. *Термическая ионизация* – распад атомов и молекул на ионы и электроны за счет их высокой кинетической энергии в области с экстремально высокой температурой (1000 °С).

2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ – УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ И КОММУТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Это усовершенствованная версия классических электромеханических аппаратов, где дуга не устраняется полностью, но максимально быстро гасится.

Принцип действия. Включение и удержание силовых контактов обеспечивается электромагнитом, управляемым дистанционно или автоматикой. Для гашения дуги при размыкании используются специальные дугогасительные камеры.

Камеры с узкими щелями. Дугогасительная решетка из изоляционного материала рассекает дугу на ряд коротких дуг, которые гаснут при первом же переходе тока через ноль.

Комбинированные камеры. Сочетают щелевую решетку с пламегасительными решетками, что полностью исключает выброс пламени и газов наружу.

Конструкция и применение. Состоит из электромагнитной системы (катушка, сердечник), контактной системы (подвижные и неподвижные контакты) и дугогасительной камеры. Бывают одно-, двух-, трех- и четырех-полюсными, для постоянного или переменного тока. Предназначены для частых коммутаций (до 3000 циклов в час) в нормальном режиме, но не для отключения токов короткого замыкания.

На рисунке 2.1. Показаны различные конструкции дуговых камер и их профили.

Элегаз – SF_6 , характеризуется дугогасительными характеристиками, что позволяет оптимизировать массо-габаритные параметры электрических аппаратов, а также выполнить трансформаторы и другие типы электротехнического оборудования в герметичном исполнении.

Следует отметить, что элегаз является ядовитым и при использовании оборудования заполненного элегазом требуется соблюдение особых мер безопасности.

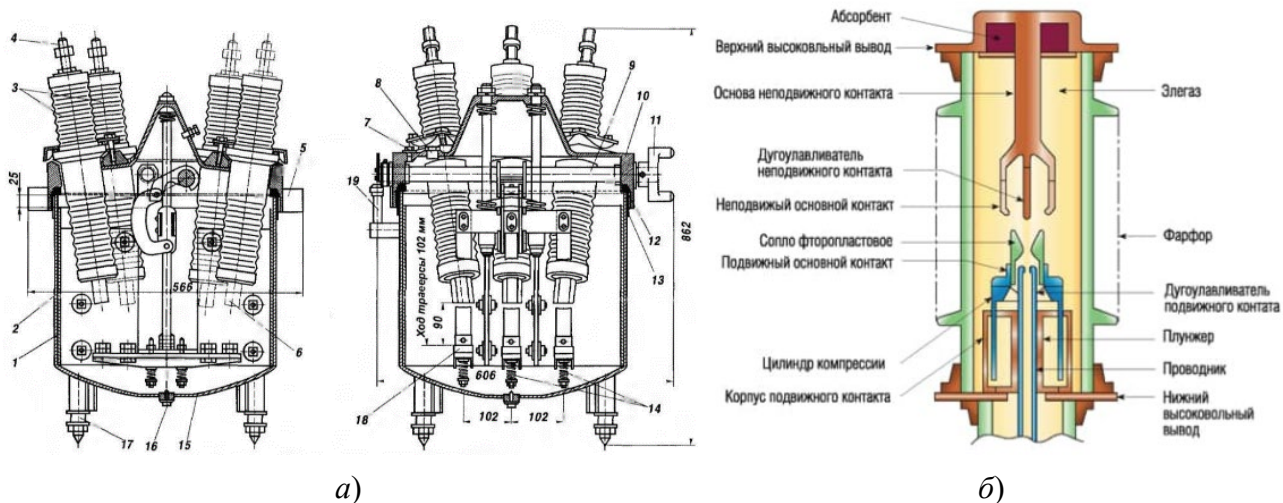


Рис. 2.1:

- а* – различные конструкции дуговых камер и их профили;
б – система дугогашения в элегазовом выключателе

Вакуумные выключатели: принцип работы, преимущества и перспективы

Вакуумный выключатель (ВВ) – это высоковольтный коммутационный аппарат, в котором контакты размыкаются и замыкаются внутри герметичной камеры с глубоким вакуумом (высоким разрежением). Он является современной и доминирующей технологией в распределительных сетях среднего напряжения.

1. Принцип работы и физика процесса

Ключевой особенностью ВВ является среда гашения дуги. Внутри вакуумной дугогасительной камеры создается и поддерживается высокий вакуум на уровне $10^{-4} \dots 10^{-6}$ Па (что эквивалентно $1,33 \times 10^{-6} \dots 1,33 \times 10^{-8}$ мбар). При таких условиях плотность газа ничтожна, и электрическая дуга не может существовать в привычной плазменной форме.

- *Формирование и гашение дуги:* в момент размыкания контактов из-за термоэлектронной эмиссии между ними возникает вакуумная дуга. Она представляет собой плазменный разряд, поддерживаемый парами металла, испаряющимися с поверхности контактов.

- *Мгновенное гашение:* гашение происходит в момент первого же перехода переменного тока через нулевое значение. В этот момент испарение металла прекращается, плазма мгновенно деионизируется, и диэлектрическая

прочность вакуумного промежутка восстанавливается со скоростью до 10...20 кВ/мкс, что является одним из самых высоких показателей среди всех типов выключателей.

2. Ключевые преимущества и области применения

Широкое внедрение вакуумных выключателей обусловлено их эксплуатационными характеристиками (табл. 2.1).

2.1. Эксплуатационные характеристики вакуумных выключателей

Преимущество	Техническая и экономическая сущность
Высокая коммутационная износостойкость	Способны выполнять десятки тысяч операций включения/отключения (в том числе под нагрузкой) без обслуживания, благодаря отсутствию эрозии контактов в инертной вакуумной среде
Быстродействие и малое время гашения дуги	Полное время отключения составляет 2–3 периода тока (40...60 мс), что минимизирует термическое и динамическое воздействие на сеть при КЗ
Компактность и экологичность	Отсутствие масла, элегаза (SF ₆) или иного дугогасящего наполнителя делает ВВ безопасными для окружающей среды, позволяет создавать малогабаритные КРУ (комплектные распределительные устройства)

Области применения: ВВ являются стандартом в распределительных сетях 6, 10, 20 и 35 кВ на подстанциях промышленных предприятий, в городских сетях, в системах собственных нужд электростанций, в ветроэнергетике и солнечной генерации.

3. Особенности конструкции и современные тренды

Механическая система ВВ – критически важный узел. Исследования ведущих компаний направлены на:

- *Оптимизацию кинематики привода* для обеспечения стабильной скорости смыкания и размыкания контактов.
- **Повышение механического ресурса** (числа операций «включено–отключено») до 30 000 – 100 000 циклов.
- *Интеграцию с цифровыми системами* (интеллектуальные реле защиты, датчики состояния).
- *Разработку ВВ на более высокие классы напряжения* (до 110 кВ и выше), где они конкурируют с элегазовыми аппаратами.

Сравнение устройств выключателей показано в табл. 2.2.

2.2. Сравнение типов выключателей

Параметр	Вакуумный выключатель (ВВ)	Элегазовый выключатель (SF ₆)	Масляный выключатель
Дугогасящая среда	Вакуум (10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁶ Па)	Элегаз (SF ₆) под давлением	Минеральное масло
Типичный диапазон напряжения	6...35 кВ (распространено), до 110 кВ	35...1100 кВ (все классы)	6...220 кВ (устаревшие сети)
Экологичность	Высокая (инертная среда)	Низкая (SF ₆ – сильный парниковый газ)	Низкая (риск утечки, утилизация)
Эксплуатационные расходы	Очень низкие	Средние (контроль давления, утилизация)	Высокие (замена масла, обслуживание)
Габариты	Компактные	Средние/крупные	Крупные

Вакуумные выключатели, благодаря уникальному сочетанию надежности, долговечности, экологичности и экономичности, стали технологическим лидером в своем классе напряжений. Их развитие продолжается в направлении увеличения коммутируемых параметров, интеграции в «умные сети» и повышения ресурса, что гарантирует им доминирующую роль в распределительной электроэнергетике на десятилетия вперед.

Предохранители: классический аппарат защиты электрических сетей

Предохранитель – это одноразовый аппарат защиты, предназначенный для автоматического отключения электрической цепи путем разрушения (плавления) специального элемента при протекании сверхтока. Это самый ранний и исторически первый тип защитного устройства, который продолжает активно использоваться благодаря своей простоте, надежности и низкой стоимости.

1. Принцип действия и ключевые компоненты

Основу предохранителя составляет **плавкая вставка** – калиброванный проводник из легкоплавкого металла (чаще всего серебро, медь, цинк или их сплавы), рассчитанный на определенный номинальный ток.

- *Нормальный режим*: при токах, не превышающих номинальный, вставка служит обычным проводником, нагреваясь в допустимых пределах.

- *Режим перегрузки или короткого замыкания (КЗ)*: при значительном превышении тока выделяемое в вставке количество тепла (I^2t) становится достаточным для ее расплавления. Цепь разрывается, предотвращая термическое и электродинамическое разрушение кабелей, аппаратов и оборудования.

Ток короткого замыкания (КЗ) – это аварийный ток, в десятки или сотни раз превышающий номинальный, способный за доли секунды вывести из строя элементы сети. Главная задача предохранителя – гарантированно и быстро отключить цепь до того, как ток КЗ достигнет своего разрушительного максимума.

2. Ключевые преимущества и современные конструктивные решения для создания устройств защиты потребителей электрической энергии

Конструктивные особенности современных предохранителей:

- *Наполнитель (кварцевый песок)*: герметичный корпус заполняется химически инертным кварцевым песком, который интенсивно охлаждает и деионизирует дугу, возникающую при плавлении вставки, обеспечивая быстрое и безопасное гашение.

- *Индикация срабатывания*: многие модели оснащаются индикаторами (выбрасываемыми штифтами, цветными флажками) для визуального определения перегоревшего предохранителя.

- *Специализированные исполнения*: существуют предохранители для защиты полупроводниковых приборов (быстродействующие), двигателей (с задержкой срабатывания при пусковых токах), солнечных батарей (для постоянного тока высокого напряжения).

3. Сравнение предохранителей с автоматическими выключателями и присущие недостатки

Несмотря на достоинства, предохранители имеют ряд эксплуатационных ограничений по сравнению с автоматическими выключателями (АВ).

В диапазоне «слабых» токов КЗ (близких к номинальным токам отключения) плавкая вставка может находиться в «промежуточном» состоянии –

не расплавиться мгновенно, но перегреваться. Это приводит к длительному протеканию опасного тока через защищаемую цепь, вызывая ее термическое повреждение. Современные АВ с тепловыми расцепителями в этой ситуации часто более эффективны.

4. Области применения

Благодаря своим уникальным свойствам предохранители (рис. 2.2) незаменимы:

- В качестве основной или резервной защиты от КЗ во вводных распределительных устройствах, где токи КЗ могут быть особенно велики.
- Для защиты силовых полупроводниковых приборов (тиристоров, диодов) в преобразователях, где критически важно сверхбыстрое отключение.

2.3. Сравнение предохранителей с автоматическими выключателями

Критерий	Предохранитель	Автоматический выключатель (АВ)
Многоразовость	Одноразовое устройство. Требуется замены после каждого срабатывания	Многоразовый аппарат. После отключения и устранения неисправности может быть снова включен
Функциональность	Обеспечивает, в основном, защиту от токов КЗ и, в меньшей степени, от перегрузки	Комбинированная защита: электромагнитный расцепитель (мгновенно от КЗ) + тепловой расцепитель (с выдержкой времени от перегрузки)



Рис. 2.2. Виды предохранителей

Вывод. Предохранитель, несмотря на кажущуюся простоту, остается высокоэффективным и часто оптимальным по критерию «цена/надежность/быстродействие» аппаратом защиты от коротких замыканий. Его основная сфера – обеспечение токоограничивающей и резервной защиты в силовых цепях, в то время как для комплексной защиты с возможностью частых переключений и настройки предпочтительны автоматические выключатели.

Режим с превышением тока более 25...30% может не вызвать срабатывания предохранителя в течение длительного времени и определяется состоянием предохранителя [9].

1. Принцип селективности и области защиты

Действие плавкого предохранителя подчиняется принципу селективности (избирательности), который можно проиллюстрировать на времятоковой характеристике [9].

Область Б (большие перегрузки и токи короткого замыкания): в этой зоне, где токи значительно превышают номинальный, плавкая вставка срабатывает с минимальной выдержкой времени (от долей секунды до нескольких секунд).

Предохранитель надежно защищает объект (кабель, оборудование) от теплового и электродинамического разрушения.

Область А (небольшие длительные перегрузки): в этой области токи незначительно превышают номинальный. Время плавления вставки может достигать одного часа и более.

Предохранитель в этом режиме объект не защищает, так как длительный перегрев проводников и изоляции оборудования до срабатывания предохранителя может привести к их повреждению.

Базовое условие для корректной работы: пограничный ток плавления вставки ($I_{\text{погр}}$) должен быть строго больше номинального тока защищаемой цепи ($I_{\text{ном}}$):

$$I_{\text{погр}} > I_{\text{ном}}$$

Это гарантирует, что в нормальном режиме работы предохранитель не срабатывает.

Автоматические выключатели: универсальные защитные аппараты в электрических сетях

Автоматический выключатель (автомат, АВ) – это ключевой элемент защиты электрических сетей, который автоматически отключает цепь при возникновении аварийных режимов, таких как перегрузка и короткое замыкание (КЗ), а затем может быть вновь включен вручную или дистанционно после устранения неисправности. Это многоразовый аппарат, в отличие от предохранителя [9].

1. Принцип действия и конструкция

Основная задача АВ – предотвратить разрушение элементов сети (кабелей, оборудования) сверхтоками. Его конструкция включает несколько ключевых узлов, работающих согласованно:

2. Классификация автоматических выключателей

Автоматы классифицируются по ряду параметров для использования в различных участках сети.

- *По роду тока в защищаемой цепи:* переменного тока (\sim), постоянного тока ($-$) и универсальные (переменного/постоянного тока).
- *По конструктивному исполнению и назначению:*
 - выключатели общего назначения – наиболее распространены в бытовых и промышленных сетях (например, серии ВА, SH, S);
 - быстродействующие выключатели – имеют собственное время срабатывания 0,02...0,08 с, используются для защиты полупроводниковых приборов и в цепях с особыми требованиями.
 - *Специальные выключатели* – для конкретных применений (например, в судовых установках, для защиты двигателей).
- *По способности ограничивать ток короткого замыкания:*
 - токоограничивающие выключатели – благодаря сверхбыстрому отключению (до 0,01 с) не дают току КЗ достичь своего максимального (установившегося) значения, что снижает электродинамические и тепловые нагрузки на оборудование;
 - нетокоограничивающие выключатели.

3. Принцип селективности (избирательности) защиты

Селективность – это главный организационный принцип построения защиты, который обеспечивает отключение только того участка сети, где произошла авария, не затрагивая остальные. Это достигается согласованной настройкой уставок по току и времени срабатывания АВ разных ступеней.

- *Временная селективность*: выключатели, расположенные ближе к источнику питания (например, на вводе), имеют большую выдержку времени (t_3) на отключение, чем выключатели ближе к потребителю (t_1). Таким образом, при КЗ в конечной точке первым сработает АВ с меньшей выдержкой (t_1), а более высокостоящий выключатель (t_3) останется включенным, продолжая питать исправные участки.

- *Токовая селективность*: номинальный ток или ток срабатывания выключателя каждой следующей ступени (ближе к потребителю) должен быть ниже, чем у предыдущей ступени.

4. Области применения и выбор

Автоматические выключатели устанавливаются во всех звеньях системы электроснабжения – от главного ввода в здание до конечных групп розеток. Их выбор определяется:

1. *Номинальным напряжением сети* (220/380, 660 В и выше).
2. *Номинальным током* нагрузки защищаемой линии.
3. *Характеристикой срабатывания* (В, С, D для бытовых и общих сетей; специальные – для защиты двигателей, трансформаторов).
4. *Отключающей способностью* (максимальным током КЗ, который аппарат может безопасно отключить).
5. *Требованием селективности* с другими защитными аппаратами.

Вывод. Автоматический выключатель является интеллектуальным и многофункциональным защитным устройством, которое сочетает в себе функции защиты, управления и индикации. Его способность обеспечивать селективность делает его незаменимым для создания надежных и безопасных электрических сетей любого масштаба – от квартиры до крупной промышленной подстанции.

Внешний вид автоматического выключателя приведен на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Внешний вид автоматического выключателя

Основные правила выбора автоматических выключателей для защиты электродвигателей

Выбор автоматического выключателя (автомата) для защиты асинхронных электродвигателей производится по совокупности параметров: номинальному напряжению и току, а также по настройкам теплового и электромагнитного расцепителей. Приведенные ниже правила являются общими и должны уточняться в соответствии с паспортными данными конкретного оборудования.

1. Базовые условия

По напряжению: номинальное напряжение автомата ($U_{\text{ном.а}}$) должно быть не меньше номинального напряжения сети ($U_{\text{ном.с}}$).

$$U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{ном.с}}$$

По току: номинальный ток автомата ($I_{\text{ном.а}}$) должен быть не меньше номинального тока нагрузки ($I_{\text{ном.н}}$).

$$I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{ном.н}}$$

2. Выбор номинального тока и уставок расцепителей

Настройка расцепителей производится с учетом типа двигателя, режима работы и условий пуска. Основные соотношения приведены в табл. 2.4.

2.4. Выбор номинального тока и уставок расцепителей для автоматического выключателя

Защищаемый объект / Режим работы	Тип расцепителя и правило выбора	Формула и пояснения
Одиночный двигатель с КЗ ротором (кратковременный или длительный режим)	Тепловой расцепитель (или комбинированный): номинальный ток расцепителя принимается равным номинальному току двигателя ($I_{ном.дв}$)	$I_{ном.расц} = I_{ном.дв}$
Одиночный двигатель, работающий в повторно- кратковременном режиме (с ПВ = 25%)	Тепловой расцепитель: номинальный ток расцепителя выбирается с запасом	$I_{ном.расц} \geq 1,5 \cdot I_{ном.дв}$
Одиночный двигатель с КЗ ротором	Электромагнитный расцепитель (отсечка): уставка выбирается для отстройки от пускового тока	$I_{уст.эм} =$ $= (2,5...3,0) \cdot I_{ном.дв}$
Одиночный двигатель с фазным ротором (пуск через реостат)	Электромагнитный расцепитель: пусковой ток ниже, чем у двигателя с КЗ ротором	$I_{уст.эм} =$ $= (2,5...3,0) \cdot I_{ном.дв}$

3. Проверка по отключающей способности

Автомат должен надежно отключать ток короткого замыкания ($I_{кз}$). Для автоматов с электромагнитным расцепителем выполняется условие:

$$I_{уст.эм} I_{кз} \geq k,$$

где коэффициент k принимается в пределах 1,25...1,4. Это гарантирует, что при коротком замыкании электромагнитный расцепитель сработает гарантированно и мгновенно, а не «зависнет» в промежуточном положении.

Силовая электроника играет ключевую роль в обеспечении стабильной и эффективной работы ветроэнергетических установок, особенно на критических этапах, таких как запуск турбины.

Полупроводниковые (электронные) аппараты

Эти устройства используют силовые электронные ключи (тиристоры, IGBT, MOSFET) для управления током.

- *Принцип действия:* основан на ключевом (импульсном) режиме работы. Полупроводниковый прибор имеет только два состояния: полностью открыт (проводит ток) или полностью закрыт (блокирует ток). Переключение между состояниями происходит за микросекунды без образования дуги.

- *Преимущества:* высокое быстродействие, огромный механический ресурс (миллиарды переключений), компактность, бесшумность.
- *Технологии:* их разработка опирается на передовые достижения микроэлектроники, компьютерного моделирования и специализированного программного обеспечения для управления.

Электронные (полупроводниковые) ключи, используемые в силовых аппаратах, обеспечивают бездуговую коммутацию, поскольку процессы включения и отключения происходят за счет изменения состояния полупроводникового кристалла. Среди транзисторов различают биполярные транзисторы, полевые транзисторы, транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated-Gate-Bipolar Transistor) (рис. 2.4).

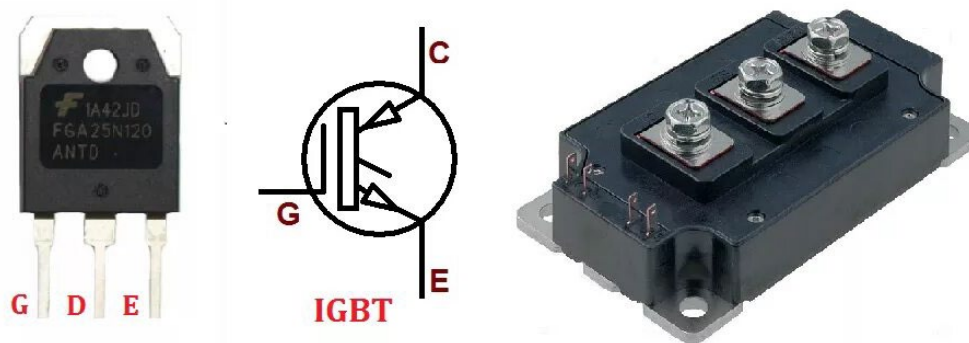


Рис. 2.4. Виды транзисторов

Полупроводниковые технологии для быстрых выключателей в распределительных сетях: Si и SiC

Современные исследования в области быстрых статических выключателей (SSCB) для распределительных сетей фокусируются на двух основных классах полупроводниковых материалов: традиционный кремний (Si) и перспективный карбид кремния (SiC). Ключевое различие между ними заключается в механизме работы и, как следствие, оптимальной области применения.

1. Кремниевые (Si) приборы: надежность для среднего напряжения

Для сетей среднего напряжения (примерно до 4,5 кВ, 4 кА) хорошо зарекомендовали себя биполярные кремниевые устройства. Их работа основана на управлении движением как электронов, так и «дырок» (биполярный режим), что обеспечивает высокую плотность тока.

- *Примеры компонентов:* IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором), тиристоры (включая усовершенствованные GTO, ETO, IGCT).
- *Ключевые преимущества:* высокая устойчивость к токам короткого замыкания и перегрузкам, проверенная надежность и относительно низкая стоимость в своем классе.
- *Основное применение:* силовые ключи и выключатели в сетях среднего напряжения, где эти качества критически важны.

2. Униполярные Si-приборы: эффективность для низких напряжений

Для низковольтных и маломощных применений чаще используются униполярные кремниевые устройства. В них ток создается преимущественно одним типом носителей заряда (электронами), что позволяет достигать очень высоких частот переключения с низкими потерями.

- *Примеры компонентов:* MOSFET (полевой транзистор с изолированным затвором металл-оксид-полупроводник), JFET (полевой транзистор с управляющим p–n переходом).
- *Основное применение:* источники питания, импульсные преобразователи, системы управления двигателями в диапазоне до ~1 кВ.

3. Карбид-кремниевые (SiC) приборы: прорыв для высоких напряжений

Материал карбида кремния (SiC) обладает фундаментально лучшими электрофизическими свойствами, чем кремний: более высокая ширина запрещенной зоны, теплопроводность и критическая напряженность электрического поля. Это делает его идеальным для сверхвысоковольтных применений (>10 кВ).

- *Примеры компонентов:* SiC MOSFET, SiC JFET (униполярные), а также биполярные устройства, такие как SiC GTO, BTO (биполярный транзистор с прозрачным эмиттером) и SiC IGBT.

В таблице 2.5 показана сводная таблица сравнения для силовых ключей.

Таким образом, выбор технологии для SSCB определяется целевым уровнем напряжения: **Si IGBT/IGCT** доминируют в сегменте среднего напряжения благодаря своей надежности, в то время как **SiC-технологии** открывают путь к созданию более эффективных и компактных решений для сетей высокого и сверхвысокого напряжения.

2.5. Сводная таблица сравнения для силовых ключей

Параметр	Кремний (Si) Биполярный (IGBT, IGCT)	Кремний (Si) Униполярный (MOSFET)	Карбид кремния (SiC) Биполярный/Униполярный
Ключевой принцип	Инжекция носителей обоих типов	Дрейф основных носителей	Модуляция проводимости/ Дрейф носителей
Оптимальный диапазон напряжений	Среднее напряжение (до 4,5...6,5 кВ)	Низкое напряжение (до ~1 кВ)	Высокое и сверхвысокое напряжение (>10 кВ)
Основные преимущества	Высокая устойчивость к перегрузкам, надежность	Высокая частота переключения, низкие потери	Высокий КПД, компактность, термостабильность
Типичное применение в SSCB	Защита сетей 6...35 кВ	Защита цепей до 1 кВ	Перспективные системы HVDC, тяговые сети

Роль устройства плавного пуска (УПП) и тиристоров

Сердцем УПП являются тиристоры – полупроводниковые ключи, которые выступают в роли быстродействующих электронных контакторов. Они управляются подачей импульсов малой мощности, что позволяет плавно регулировать напряжение, подаваемое на обмотки генератора.

Тиристоры в ветроэнергетике решают не только задачу плавного пуска. После подключения к сети они продолжают работать, обеспечивая:

- *Управление мощностью*: регулировка подачи тока на генератор для оптимизации выработки энергии при разной скорости ветра.
- *Синхронизацию с сетью*: обеспечение соответствия вырабатываемой электроэнергии параметрам сети (напряжение, частота).
- *Защиту*: быстрое отключение турбины от сети при колебаниях напряжения, коротких замыканиях или других аномалиях.

Таким образом, силовая электроника является технологическим фундаментом современной ветроэнергетики, превращая нестабильную энергию ветра в качественную электрическую энергию, пригодную для интеграции в общую энергосистему.

3. ТРОЛЛЕЙБУСЫ И ТРАМВАИ – ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Троллейбусы и трамваи – уникальные потребители электрической энергии, чьи характеристики кардинально отличаются от промышленных или бытовых нагрузок. Их массовое использование в городской среде требует специфического подхода к проектированию и эксплуатации энергосистем.

Мощные и мобильные нагрузки: это не стационарные объекты, а движущиеся потребители с высокой единичной мощностью (от сотен кВт до 1...2 МВт для составов). Их энергопотребление сопоставимо с небольшим заводским цехом, который постоянно перемещается по городу.

Резкопеременный график нагрузки: потребление энергии крайне нестабильно и зависит от режима движения.

Пиковая нагрузка: резкий старт (разгон) – максимальное потребление.

Стабильная нагрузка: движение с постоянной скоростью – умеренное потребление.

Регенеративное торможение: в современных моделях при торможении двигатель работает как генератор и возвращает электроэнергию в сеть (отрицательная нагрузка). Минимальное потребление энергии (освещение, климат-контроль).

Зависимость от графика движения: суммарная нагрузка на подстанции четко повторяет расписание: утренний и вечерний часы пик, спад днем и ночью. Это позволяет прогнозировать нагрузку. Ключевые различия и особые особенности троллейбусов и трамваев показаны в табл. 3.1.

Выводы для энергетиков и городских властей

1. *Трамвай – это крупный, энергоэффективный, но «агрессивный» потребитель, требующий дорогих мер защиты от блуждающих токов и грамотного распределения нагрузки по фазам внешней сети. Его выгоды раскрываются на магистральных линиях с большим пассажиропотоком.*

3.1. Ключевые различия и особые особенности троллейбусов и трамваев

Особенность	Трамвай	Троллейбус
1. Система электроснабжения	Рельсовая (нижнее): – плюс: контактный провод (+); – минус: рельсы (–), которые выполняют роль обратного провода	Двухпроводная (верхнее): – два контактных провода (+ и –); – полная гальваническая изоляция от земли
3. Проблемы с качеством электроэнергии	Блуждающие токи: главная проблема. Ток стекает с рельсов в землю, вызывая коррозию подземных металлических коммуникаций (труб, кабелей). Асимметрия напряжения в плечах питания	Проблема изоляции: Нет блуждающих токов, но есть риск короткого замыкания между двумя проводами. Большие потери напряжения на длинных участках из-за малого сечения проводов
4. Конфигурация сети	Линейная с секционированием. Сеть относительно проще, но требует сложных стрелочных механизмов и пересечений	Разветвленная сеть. Требуется развитой инфраструктуры (перекрестки, стрелки, спецсекции), которая сложнее и визуально загромождает улицы

2. *Троллейбус* – это более гибкий, но менее эффективный потребитель с меньшими капитальными затратами на инфраструктуру (нет рельсов), но с более высокими эксплуатационными расходами на содержание сложной контактной сети и потерями в ней.

Оба вида транспорта активно оснащаются системами рекуперативного торможения и вспомогательными аккумуляторами (или суперконденсаторами). Это превращает их из простых потребителей в продвинутых просьюмеров, которые могут временно отдавать энергию в сеть, сглаживая пиковые нагрузки и повышая общую эффективность системы.

Электроснабжение и энергопотребление троллейбусов и трамваев тесно переплетены. В таблице 3.2 представлено их сравнение по основным аспектам.

3.2. Электроснабжение и энергопотребление троллейбусов и трамваев

Аспект	Трамвай (основные модели)	Троллейбус (основные модели)
Типичное рабочее напряжение	600 В или 750 В постоянного тока	550...600 В постоянного тока
Потребляемая мощность (тяговый привод)	Мощность двигателей: 40...100 кВт и более на вагон (суммарно)	Мощность тягового двигателя: 115...150 кВт на машину
Расход энергии (удельный)	~75...112 кВт·ч/1000 т·км (напр., модели 71-605, ЛМ-68, Т-3)	~80...150 кВт·ч/1000 т·км (напр., ЗиУ-682, ВМЗ-5298)
Основные эксплуатационные особенности	Рельсовый ход (малое сопротивление, высокая пассажироместимость); зависит от состояния пути; чувствителен к профилю пути и кривым	Безрельсовый, привязан к сети; зависит от дорожного покрытия и состояния контактной сети; чувствителен к обледенению проводов

Аспекты эксплуатации и энергопотребления

На энергопотребление и особенности эксплуатации влияет множество факторов, и понимание этих нюансов критически важно для эффективного управления парком.

- *Факторы, влияющие на расход энергии:*
 - профиль маршрута: ключевой фактор;
 - эквивалентный уклон – расчетный показатель, учитывающий подъемы, спуски и для трамвая – сопротивление в кривых, напрямую увеличивает расход;
 - режим движения: средняя эксплуатационная скорость. Отклонение от базовой (15...16 км/ч) меняет расход;
 - внешние условия: низкая температура воздуха и снежный покров требуют больше энергии;
 - вспомогательное оборудование: отопление салона, кондиционер, освещение, компрессор и др. Их работа может составлять значительную долю расхода.

- *Сравнительная эффективность*: трамвай энергетически эффективнее на единицу перевезенного пассажира благодаря минимальному сопротивлению качения стальных колес по рельсам. Срок службы его подвижного состава также обычно выше. Троллейбус, как правило, уступает трамваю по энергоэффективности перевозки, но обладает большей маневренностью (в пределах контактной сети) и дешевле в разворачивании.

- *Рекуперация энергии*: современные троллейбусы и трамваи оснащаются системами рекуперативного торможения, которые могут возвращать в сеть до 70% кинетической энергии, существенно экономя энергию. В настоящее время оба вида транспорта активно развиваются, интегрируя новые технологии и адаптируясь к современным требованиям: *троллейбус* (рис. 3.1, а) эволюционирует в сторону автономии: его главный тренд – оснащение системами автономного хода (аккумуляторы, суперконденсаторы). Это позволяет объезжать препятствия, заезжать в районы без контактной сети и экономить энергию на сложных участках.

1. *Трамвай* (рис. 3.1, б) переживает «ренессанс»: он воспринимается как экологичный каркас для транспортного развития городов. Внедряются низкопольные вагоны, системы тиристорно-импульсного управления (ТИСУ) и бортовые компьютеры, что позволяет экономить до 25% энергии. Строятся выделенные скоростные линии. Троллейбусные тяговые подстанции – это узловые электроустановки, которые принимают энергию от городских сетей, преобразуют ее и распределяют по контактной сети. Их основная задача – обеспечить бесперебойное и безопасное питание троллейбусов постоянным током. *Распределение*: Выпрямленный постоянный ток (600 В на шинах подстанции) через распределительное устройство и быстродействующие выключатели по кабелям подается в контактную сеть. На токоприемниках троллейбусов напряжение составляет около 550 В.

Основные характеристики и требования

В таблице 3.3 приведены ключевые параметры и особенности эксплуатации троллейбусных подстанций.



Рис. 3.1. Троллейбус и трамвай

3.3. Ключевые параметры и особенности эксплуатации троллейбусных подстанций

Параметр	Описание
Назначение	Электроснабжение троллейбусной контактной сети, а также депо, мастерских и других объектов
Категория надежности	Потребитель первой категории (максимальной). Питание всегда осуществляется не менее чем от двух независимых источников
Выходное напряжение	600 В на шинах подстанции (допустимый рабочий диапазон 600...700 В)
Ключевое оборудование	Распределительные устройства (РУ) переменного и постоянного тока, силовые трансформаторы, полупроводниковые выпрямители, системы релейной защиты и автоматики
Системы управления	Современные подстанции – телеуправляемые и автоматизированные, часто без постоянного персонала. Управление ведется дистанционно с диспетчерского пункта
Резервирование	Обязателен резерв мощности (дополнительный выпрямитель или возможность перераспределения нагрузки на соседние подстанции) для бесперебойности

Управление и эксплуатация

- *Автоматика и телемеханика*: обеспечивают дистанционный контроль, управление и защиту, повышая надежность и сокращая затраты.
- *Резервирование*: для питания собственных нужд подстанции (освещение, системы управления) также предусматривается резервный источник.

- *Эксплуатационные требования:* подстанции должны соответствовать строгим нормам (ПУЭ, ПЭЭП, СНиПам) по электро- и пожаробезопасности, уровню шума и санитарным нормам (рис. 3.2).

Если вас интересует более глубокая информация по определенному аспекту – например, по схемам подключения или современным системам управления на основе микропроцессоров, – уточните ваш запрос.

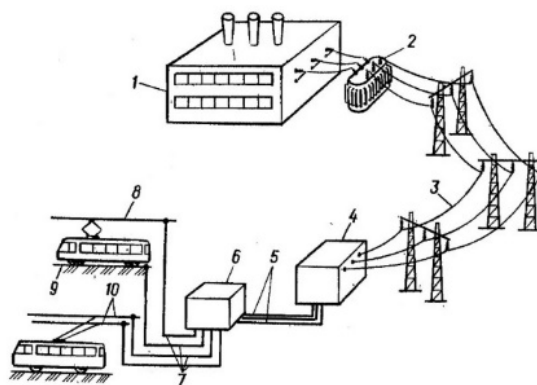


Рис. 3.2. Тяговые подстанции

Зарядная инфраструктура для электротранспорта как массовый потребитель электрической энергии

Массовое распространение электрического транспорта – от электромобилей и городского электротранспорта до складской техники и персональных устройств – стало катализатором глубокой технологической трансформации в двух взаимосвязанных областях: развитии электрохимических систем накопления энергии и электроэнергетике. Новые требования транспорта стимулировали прорыв в электрохимии аккумуляторов, а их возросшие возможности, в свою очередь, поставили новые вызовы перед энергосистемами и инфраструктурой зарядки, сформировав нового потребителя.

1. Эволюция аккумуляторов: от никеля к кремнию

Ключевым драйвером роста стала эволюция тяговых аккумуляторов. Если первые серийные электромобили использовали никель-металлогидридные (Ni-MH) батареи с ограниченной энергоемкостью, то настоящую революцию совершило массовое внедрение литий-ионных технологий.

- *Литий-ионные аккумуляторы* обеспечили радикальный скачок в ключевых для транспорта параметрах: удельной энергоемкости (запас хода), мощности (динамика) и сроке службы.

Развитие пошло дальше простого использования лития. Появились и продолжают совершенствоваться различные химические составы катодов:

- *NMC* (никель–марганец–кобальт): баланс энергии и мощности, стандарт для многих электромобилей.

- *LFP* (литий–железо–фосфатные): повышенная безопасность, долговечность и доступность (без кобальта и никеля), что снижает стоимость.

- *NCA* (никель–кобальт–алюминиевые): высокая энергоемкость, используется Tesla.

Эта эволюция напрямую сформировала требования к зарядке: современные батареи способны принимать все более высокую мощность, что и привело к появлению сверхбыстрых зарядных станций.

2. Трансформация инфраструктуры: от розетки до «умной» сети

Растущие аппетиты электропарка потребовали фундаментального развития зарядной и энергетической инфраструктуры. Это развитие идет по нескольким ключевым направлениям:

- *Мощность и скорость зарядки.* Инфраструктура эволюционировала от бытовых розеток (менее 3 кВт) к мощным DC-станциям сверхбыстрой зарядки (150...350 кВт и более), способным пополнить запас хода на сотни километров за 15...30 минут.

- *Сетевые нагрузки и управление.* Массовая одновременная зарядка представляет вызов для стабильности энергосетей. Ответом становится развитие:

- *умной зарядки (Smart Charging):* системы, которые динамически распределяют мощность или смещают время зарядки на периоды низкой сетевой нагрузки (ночью);

- *технологии Vehicle-to-Grid (V2G):* электромобиль становится не просто нагрузкой, а мобильным накопителем энергии, который может отдавать электроэнергию обратно в сеть в пиковые периоды, помогая ее балансировать.

- *Стандартизация и доступность.* Развитие идет в сторону унификации разъемов (например, стандарт CCS Combo в Европе) и создания плотной, удобной сети публичных зарядных станций, в том числе в составе АЗС и общественных пространств.

Сравнение зарядных станций для электромобилей можно проводить по нескольким ключевым критериям: скорости (классу) зарядки, типу тока, стандарту разъема и целевому назначению. Основные характеристики и сферы применения различных типов зарядных станций сведены в табл. 3.3.

При выборе важно понимать несколько основных технических моментов, так как они напрямую влияют на совместимость и скорость:

- *Ток и где происходит преобразование:* аккумулятор электромобиля заряжается только постоянным током (DC). В медленных и ускоренных станциях используется переменный ток (AC), который затем преобразуется в DC бортовым зарядным устройством (ЗУ) автомобиля. Его мощность – ограничивающий фактор. Быстрые станции сами преобразуют ток в DC и подают его напрямую в батарею, минуя маломощное бортовое ЗУ автомобиля.

3.3. Типы зарядных станций для электромобилей

Критерий	Медленные (AC/Mode 2)	Ускоренные (AC/Mode 3)	Быстрые (DC/Mode 4)
Основной тип тока	Переменный ток (AC)	Переменный ток (AC)	Постоянный ток (DC)
Типичная мощность	2,3...7,4 кВт	11...22 кВт (до 43 кВт для некоторых)	50...350 + кВт
Типичное время зарядки	8...12 + часов (полный заряд)	3...6 часов (полный заряд)	20...40 минут (до 80%)
Ключевой сценарий	Домашняя зарядка через обычную или усиленную розетку	Домашняя wallbox, отели, офисы, торговые центры	Общественные станции на трассах, АЗС, в крупных ТЦ
Основные разъемы (AC)	Type 1 (J1772), Type 2 (Mennekes)	Type 2 (Mennekes)	CCS Combo, CHAdeMO, GB/T DC, Tesla Supercharger

- *Классы (режимы) зарядки (Mode)*: это стандартизированные категории, которые объединяют технические и защитные характеристики.

- *Разъемы и региональные стандарты*: воспринимайте разъем как «розетку» для автомобиля. Выбор зависит от региона и марки электромобиля (рис. 3.3 – 3.5). Основные стандарты:

- *Type 1 (J1772)*: распространен в Северной Америке и Азии. Однофазный, до 7,4 кВт.

- *Type 2 (Mennekes)*: Европейский стандарт, включая Россию. Поддерживает одно- и трехфазную сеть, до 22...43 кВт.

- *CCS Combo (Combined Charging System)*: универсальный стандарт для быстрой зарядки. Представляет собой разъем Type 1 или Type 2 с двумя дополнительными контактами для постоянного тока. Мощность до 350 кВт.

- *CHAdeMO*: японский стандарт для быстрой зарядки DC.

- *GB/T*: китайский стандарт для AC и DC зарядки.



а)



б)



в)

Рис. 3.3:

а – грузовой электромобиль; б – легкой миниэлектромобиль;

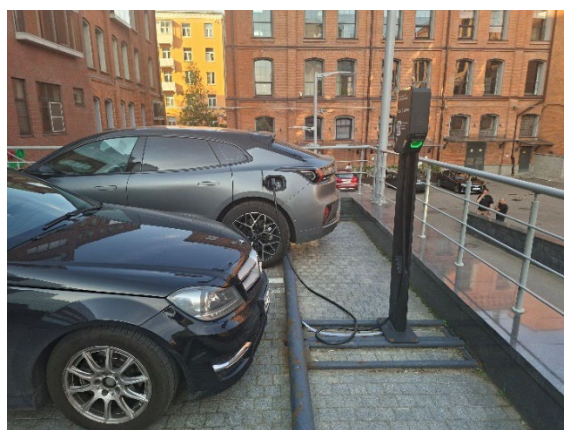
в – устройство электропривода электротранспорта



a)



б)



в)

Рис. 3.4. Зарядная инфраструктура для электротранспорта:

a – зарядная станция Type 1 (J1772); *б* – зарядное устройство малого электромотоцикла или мотоцикла; *в* – зарядная станция Type 2 (Mennekes)



a)



б)

Рис. 3.5. Зарядная инфраструктура для электротранспорта:

a – зарядная станция Type 2 (Mennekes); *б* – зарядная станция Type 1 (J1772)

Массовое распространение также находит автономный электротранспорт, который обеспечивает грузоперевозки в условиях городской среды (рис. 3.6).

Важным трендом является интеграция зарядных станций в традиционные АЗС, что снижает затраты на строительство инфраструктуры и удобно для водителей. Основным стандартом для зарядки переменным током в России и Европе является разъем Type 2 (Mennekes), а для быстрой зарядки постоянным током – CCS Combo.

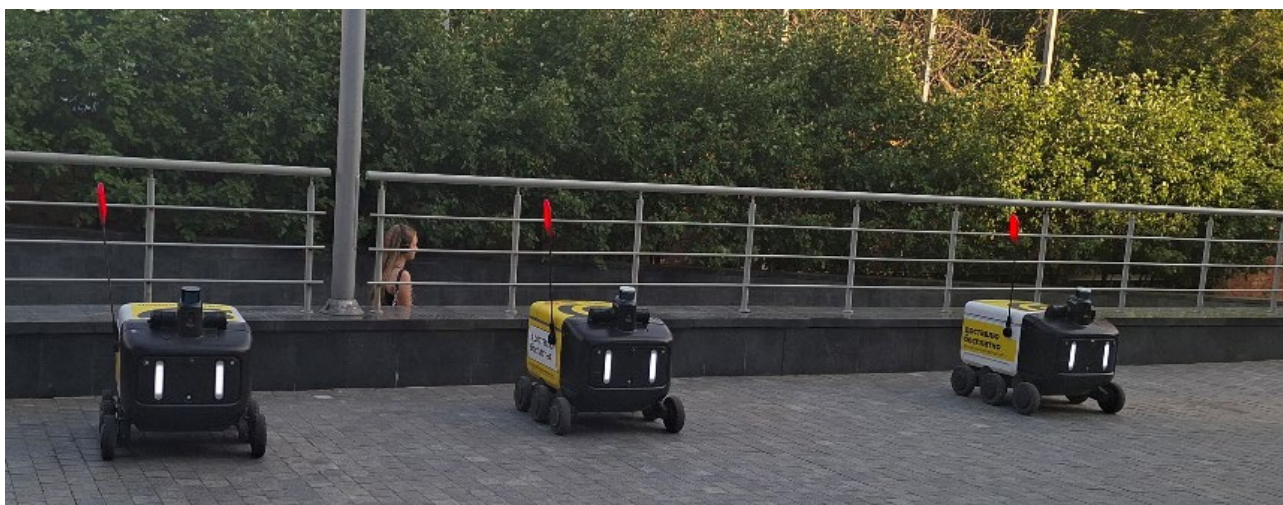


Рис. 3.6. Автономный электротранспорт

4. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ: АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Нейронные сети и искусственный интеллект (ИИ) [14] меняют подход к управлению и оптимизации энергопотребления – от городской квартиры до промышленного предприятия (табл. 4.1).

4.1. Ключевые сферы применения технологии ИИ

Сфера применения	Цели использования нейронных сетей	Примеры решений и технологий
Прогнозирование нагрузки	Повышение точности прогнозов спроса и выработки энергии для балансировки сетей	Анализ исторических данных, погоды, производственных планов. Использование LSTM-сетей и ансамблей моделей (XGBoost)
Оптимизация потребления (Demand Response)	Снижение затрат за счет избегания пиковых нагрузок и работы в оптимальные тарифные периоды	Интеллектуальные системы управления зданиями (BMS) с ИИ, которые регулируют климат и освещение. Цифровые двойники предприятий для выбора оптимальных режимов работы оборудования
Интеграция ВИЭ	Управление нестабильной генерацией от солнечных и ветровых станций	Прогноз выработки на основе метеоданных, оптимизация работы систем накопления энергии (аккумуляторов)

Промышленные предприятия

Для предприятий ИИ – это инструмент прямой экономии.

Прогнозирование потребления: анализ многолетних данных, производственных графиков и внешних факторов (погода, команды системного оператора) с помощью ML-моделей.

1. *Прогнозирование пиков нагрузки:* позволяет скорректировать график работы, чтобы избежать дорогостоящих пиков мощности.

2. *Оптимизация режимов работы*: создается «цифровой двойник» предприятия, который на основе прогнозов и математического оптимизатора подбирает режим работы оборудования для выполнения плана с минимальными затратами на энергоресурсы.

Эксперты прогнозируют, что уже в ближайшие годы технологии ИИ станут стандартом для энергоэффективных решений. В то же время существует и «обратная сторона»: сами центры обработки данных, на которых работают сложные нейросети, становятся крупнейшими потребителями энергии. По некоторым прогнозам, к 2035 году их доля может достичь 4,4% от мирового потребления.

Таким образом, ИИ становится ключевым инструментом для решения сложной двуединой задачи: с одной стороны, он помогает потребителям экономить и оптимизировать расход энергии, а с другой – дает энергосистемам инструменты для управления растущей и все более сложной нагрузкой.

Если вы хотите глубже разобраться в каком-то конкретном аспекте (например, в алгоритмах прогнозирования или в кейсах для конкретной отрасли), уточните ваш вопрос.

Для прогнозирования потребления электроэнергии используются разные типы нейронных сетей, каждый из которых решает определенные задачи и подходит для различных временных интервалов.

Основные типы моделей, их сильные стороны и области применения представлены в табл. 4.2.

- *Краткосрочное оперативное прогнозирование (на сутки – неделю вперед)* чаще всего решается с помощью LSTM, GRU или ансамблевых методов (например, XGBoost). Эти модели хорошо учитывают суточные и недельные циклы, температуру и тип дня (рабочий/выходной). В исследовании для энергосистемы Урала модели LSTM и градиентного бустинга показали погрешность менее 1%.

- *Прогнозирование с учетом многих факторов* (погода, экономические показатели, социальные события) может быть эффективно с использованием архитектур Transformer или комбинированных (гибридных) моделей.

4.2. Аспекты применения технологий ИИ

Тип модели/ Архитектура	Основные сильные стороны	Типичный горизонт прогнозирования	Лучше всего подходит для
Рекуррентные нейронные сети (RNN) и их модификации	Учет временной последовательности, «память» о предыду- щих данных	Краткосрочный (часы, дни)	Прогноз спроса для управления генерацией, плани- рование работы предприятий
LSTM (Long Short-Term Memory)	Решение проблемы «забывания» в RNN, улавливание долго- срочных зависимостей	Кратко- и сред- несрочный (от часов до недели)	Прогнозирование с учетом сложных сезонных и недель- ных паттернов
GRU (Gated Recurrent Unit)	Более простая и быст- рая архитектура, чем LSTM, при схожей эффективности	Краткосрочный (часы, дни)	Задачи, где важна скорость обучения и обработки
Сверточные нейронные сети (CNN)	Выявление локальных паттернов и аномалий в данных	Оперативный анализ	Обнаружение безучетного потребления, анализ профилей нагрузки

- *Выявление аномалий и неучтенного потребления* (безучетное потребление) – задача для сверточных нейронных сетей (CNN). Они анализируют график нагрузки потребителя и ищут отклонения от типичного «профиля».

Перспективы и тренды

- *Гибридные модели*, сочетающие разные архитектуры (например, CNN + LSTM), становятся трендом для учета как пространственных, так и временных закономерностей.

- *Повышение энергоэффективности* самих алгоритмов – отдельное важное направление. Разработчики стремятся создавать модели, которые требуют меньше вычислительных ресурсов для обучения и работы.

Главный вывод. Не существует универсальной «лучшей» модели. Выбор и настройка архитектуры нейронной сети – это всегда поиск оптимального компромисса между точностью, скоростью работы, сложностью реализации и доступными вычислительными ресурсами.

Для конкретного типа потребителя (например, промышленное предприятие, жилой квартал) или горизонта прогнозирования, на котором вы хотели бы сосредоточиться, можно дать более детальные рекомендации.

Телеметрия, необходимая для управления электропотребителями, реализуется через две ключевые технологии, различающиеся масштабом и подходом: централизованные интеллектуальные сети и распределенные системы Интернета вещей (IoT). В таблице 4.3 показаны основные различия технологий «Умные сети» (Smart Grid) и WAMS с Распределенные IoT-системы.

4.3. Различия технологий «Умные сети» (Smart Grid) и WAMS с Распределенные IoT-системы

Параметр	«Умные сети» (Smart Grid) и WAMS	Распределенные IoT-системы
Основная цель	Управление энергосистемой в целом, обеспечение надежности и устойчивости	Управление отдельными потребителями (зданиями, установками) для экономии и комфорта
Масштаб	Регион, страна, высоковольтные сети	Отдельное здание, квартира, группа устройств
Ключевые технологии	Устройства синхронизированных векторных измерений (PMU), смарт-счетчики, АИИС КУЭ	Датчики, умные розетки, термостаты, локальные шлюзы
Сбор данных	Централизованный, высокочастотный (до 50/60 измерений в секунду), с синхронизацией по GPS/ГЛОНАСС	Распределенный, по запросу или событию, через сети Wi-Fi, LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT)
Управление	Автоматическое сетевое (релейная защита, балансировка), диспетчерское	Автоматическое локальное по правилам (сценариям) и ручное удаленное через приложение

5. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ПОТРЕБИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Робототехнические системы находят массовое применение в различных технологических задачах [15]. Классификация, связывающая массогабаритные характеристики робота (рис. 5.1) с его энергопотреблением (табл. 5.1). Ключевой параметр – это средняя потребляемая мощность.



Рис. 5.1. Робототехнический комплекс

5.1. Классификация робототехнических систем по уровню энергопотребления

Класс мощности	Диапазон потребляемой мощности	Характерные типы роботов и примечания
Малая мощность	До 10 Вт	Небольшие образовательные или исследовательские роботы, миниатюрные датчики
Средняя мощность	От 10 до 250 Вт	Бытовые роботы (пылесосы, роботы-газонокосилки), сервисные и некоторые логистические роботы
Высокая мощность	От 250 до 1000 Вт	Промышленные манипуляторы легкого и среднего класса (например, серия UR), мобильные роботизированные платформы
Сверхвысокая мощность	Более 1000 Вт	Крупные промышленные роботы, тяжелые мобильные платформы, специальная техника (например, экзоскелеты)

Основные аспекты энергопотребления и снабжения

1. *Структура энергозатрат*: энергия расходуется не только на привод (двигатели), но и на работу системы управления (контроллеры, процессоры), датчики (камеры, лидары), связь и вспомогательное оборудование. Мобильные роботы дополнительно затрачивают энергию на передвижение.

2. *Специфика динамики нагрузки*: для роботов характерны резкие переходные процессы (скачки потребления), возникающие при старте, остановке, подъеме груза или быстром изменении направления движения. Эти пиковые нагрузки предъявляют повышенные требования к источникам питания и системам управления.

3. *Оптимизация энергопотребления*: повышение энергоэффективности – приоритетное направление. Методы можно разделить на два подхода:

– *аппаратные*: проектирование облегченных конструкций, использование компенсаторов нагрузки (например, пружин или пневматики), рекуперация энергии при торможении;

– *программные*: оптимизация траекторий движения для минимизации ускорений и пиковой мощности, интеллектуальное планирование задач для снижения времени простоя.

Робототехнические системы выступают как потребители энергии со сложным, динамичным профилем нагрузки. Их эффективная эксплуатация невозможна без комплексного подхода, включающего корректный подбор и управление источниками питания, оптимизацию как аппаратной части, так и алгоритмов работы. Тенденция к автономности и рост числа роботов делают вопросы их энергоэффективности и энергоснабжения критически важными для развития отрасли.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

I. Основы и структура электроэнергетики

1. **Определение и компоненты электроэнергетической системы:** что входит в ее состав и какова ее роль?

2. **Классификация и технические параметры электроприемников:** по каким ключевым критериям (мощность, род тока, напряжение и др.) они различаются?

3. **Схемы питания потребителей разных категорий надежности:** как обеспечивается бесперебойность электроснабжения для I, II и III категорий?

4. **Типология потребителей по территориальному признаку:** каковы особенности потребителей в городской и сельской среде?

5. **Сравнительный анализ групп потребителей:** чем отличаются их графики нагрузок, требования к надежности и качеству энергии?

II. Анализ электрических нагрузок и режимов работы

6. **Понятие и виды графиков электрической нагрузки:** как графически отображается изменение потребления во времени?

7. **Типовые графики нагрузки энергосистемы:** каковы характерные суточные, недельные и сезонные профили?

8. **Метрики неравномерности потребления:** какие коэффициенты (заполнения, формы, неравномерности) используются для ее оценки?

9. **Вероятностные методы построения графиков нагрузки:** как теория вероятностей помогает прогнозировать потребление?

10. **Особенности графиков нагрузки промышленных предприятий:** как технологический цикл влияет на электропотребление?

III. Технические аспекты электроснабжения и расчета

11. **Коэффициенты, используемые при анализе графиков нагрузок:** как применяются коэффициенты спроса, одновременности, максимума?

12. **Оценка загрузки элементов электрических сетей:** от чего зависит и как нормируется?

13. **Система напряжений в сетях электроснабжения:** каковы стандартные уровни (высокое, среднее, низкое) и их назначение?

IV. Потребители по отраслям и технологическому назначению

14. **Металлургическое производство:** особенности потребления (плавильные печи, прокатные станы).

15. **Машиностроительное производство:** специфика нагрузок (станки, автоматические линии).

16. **Химическое производство:** характер электропотребления (электролиз, приводы насосов и компрессоров).

17. **Компрессорные установки:** режимы работы и требования к электроснабжению.

18. **Насосные установки:** характеристики и параметры нагрузок.

19. **Вентиляционные установки:** особенности потребления электроэнергии.

20. **Подъемные установки:** режимы работы и специфика нагрузок.

21. **Конвейерные установки:** характеристика электропотребления.

22. **Осветительные установки:** параметры и особенности нагрузок.

23. **Электрические печи:** специфические характеристики как потребителя энергии.

V. Учет электроэнергии и оптимизация режимов

24. **Методы обеспечения рациональных режимов электроснабжения:** компенсация реактивной мощности, регулирование напряжения и др.

25. **Принцип работы и конструкция индукционных счетчиков:** как работает механический учет?

26. **Классификация и технические параметры электросчетчиков:** типы, классы точности, интерфейсы.

27. **Конструктивные особенности современных счетчиков:** из чего состоят электронные и гибридные модели?

28. **Схемы подключения счетчиков к сети:** прямое включение и через трансформаторы тока.

29. **Роль измерительных трансформаторов в цепях учета:** для чего используются трансформаторы тока и напряжения?

30. Методы выявления хищений электроэнергии: анализ балансов мощностей, проверка схем включения, данные АСКУЭ.

31. Цифровые (электронные) счетчики: преимущества, архитектура, функциональность в составе АСКУЭ.

Дополненные вопросы

I. Основы, структура и анализ нагрузок

1. Применение нейронных сетей для моделирования и анализа энергосистем: как НС могут использоваться для цифрового моделирования и прогнозной аналитики в энергосистемах?

2. Автоматическая классификация потребителей с помощью методов машинного обучения: можно ли использовать НС для автоматического сегментирования потребителей по паттернам потребления вместо ручной классификации?

II. Углубленный анализ и прогнозирование нагрузок

3. Понятие и виды графиков электрической нагрузки.

4. Характерные графики нагрузки энергосистемы.

5. Прогнозирование электрических нагрузок с использованием нейронных сетей: какие архитектуры НС (LSTM, GRU, трансформеры) наиболее эффективны для кратко-, средне- и долгосрочного прогноза?

6. Использование теории вероятностей и машинного обучения для построения графиков: как объединяются вероятностные методы и НС для оценки неопределенности в прогнозах?

7. Прогнозирование пиковых нагрузок промышленных предприятий на основе данных о технологическом цикле: как, используя НС и данные SCADA, предсказать пики потребления цеха или завода?

III. Потребители по отраслям и технологическому назначению (Дополнение для каждой отрасли)

8. Оптимизация энергопотребления технологических установок с помощью нейросетевых систем управления: как НС, работая в реальном времени, могут оптимизировать работу компрессоров, насосов, вентиляторов, печей для снижения удельного расхода энергии?

9. Предиктивное техническое обслуживание силового оборудования на основе анализа данных нейронными сетями: как НС по данным вибрации, температуры, токов могут предсказывать отказ электродвигателя, трансформатора или другого оборудования до его возникновения?

IV. Учет, оптимизация и безопасность

10. Интеллектуальные системы управления спросом (Demand Response) на базе ИИ: как НС помогают автоматически снижать нагрузку у потребителей в обмен на снижение тарифа, балансируя сеть?

11. Способы обнаружения хищений электроэнергии.

○ **Выявление безучетного и бездоговорного потребления с помощью нейронных сетей:** Как алгоритмы машинного обучения (например, сверточные сети) анализируют графики нагрузки для поиска аномалий, указывающих на хищение?

12. Цифровые счетчики и системы учета.

○ **Роль нейронных сетей в АСКУЭ и «умных сетях» (Smart Grid):** Как НС обрабатывают большие данные с миллионов счетчиков для анализа, прогноза и управления сетью?

V. Новый раздел: Специальные вопросы по применению нейронных сетей

32. Подготовка данных для обучения нейронных сетей в электроэнергетике: какие основные этапы (сбор, очистка, нормализация, аугментация) и специфические проблемы (пропуски, шумы) существуют?

33. Архитектура гибридных моделей для прогнозирования в энергетике: в чем преимущество комбинации разных моделей (например, CNN для выявления признаков + LSTM для прогноза во времени)?

34. Обеспечение кибербезопасности и устойчивости нейросетевых систем управления энергообъектами: какие ключевые угрозы и методы защиты существуют для ИИ-систем в критической инфраструктуре?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение приемников и потребителей электрической энергии позволяет сформировать целостное понимание финального звена энергетической цепочки, где электрическая энергия преобразуется в другие виды для выполнения полезной работы. Это знание является фундаментальным для проектирования, эксплуатации и оптимизации любых систем электроснабжения.

Ключевые аспекты, определяющие подход к потребителям:

Системная иерархия и классификация. Четкое разграничение понятий электроприемника (конечное устройство) и потребителя (технологически объединенная группа приемников или юридическое лицо) задает структуру анализа. Их классификация по мощности, роду тока, режиму работы и, что критически важно, категории надежности электроснабжения (I, II, III) является первым шагом к созданию безопасной и бесперебойной системы.

Технологическое разнообразие и специфика нагрузок. Характер потребления энергии кардинально различается в зависимости от отрасли и типа установки:

Промышленность (металлургия, химия, машиностроение) характеризуется высокими и часто резкопеременными нагрузками, высокими требованиями к качеству электроэнергии и надежности.

Общепромышленные установки (электропривод, насосы, вентиляторы, печи) формируют основу силовой нагрузки, и их эффективность напрямую определяет экономику предприятия.

Жилищно-коммунальный сектор отличается массовостью, преобладанием однофазных нагрузок, ярко выраженным суточным и сезонным графиком с пиками, требующими управления.

Взаимоотношения потребителя с энергосистемой регулируются договором энергоснабжения, который фиксирует технические и финансовые условия. Грамотное построение этих отношений, включая вопросы учета, компенсации

реактивной мощности, оптимизации тарифов и распределения потерь, является необходимым условием для минимизации затрат и избегания переплат.

Современные вызовы и тенденции трансформируют традиционный подход к электрохозяйству:

Интеллектуализация («Smart Grid», АИИС КУЭ, IoT) позволяет перейти от пассивного учета к активному управлению нагрузками в реальном времени. Энергоэффективность и ресурсосбережение становятся обязательными требованиями, реализуемыми через современный регулируемый электропривод, системы компенсации реактивной мощности и энергоаудит. Интеграция распределенной генерации (ВИЭ) и новые типы нагрузок (электромобили, ЦОД) меняют структуру потребления, требуя от систем электроснабжения повышенной гибкости и управляемости. Таким образом, эффективное и надежное электроснабжение – это всегда компромисс и баланс между техническими возможностями, экономической целесообразностью и нормативными требованиями. Современный инженер-энергетик должен владеть не только методами расчета нагрузок и выбора оборудования, но и понимать экономику энергопотребления, правовые основы и цифровые инструменты для управления сложным и динамичным электрохозяйством в условиях энергетического перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М. : НЦ ЭНАС, 2016. – 488 с.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. Приказом Минэнерго России от 13.01.2003. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 320 с.
3. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для вузов / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2007. – 672 с.
4. Сюсюкин, А. И. К вопросу об оплате (надбавках) за реактивную электроэнергию / А. И. Сюсюкин // Промышленная энергетика. – 2001. – № 9. – С. 53 – 55.
5. ГОСТ 17703–72. Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.01.1974. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.
6. Сборник нормативно-технических и методических документов по измерениям, коммерческому и техническому учету электрической энергии и мощности. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 504 с.
7. Конюхова, Е. А. Электроснабжение объектов : учебное пособие / Е. А. Конюхова. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2006. – 320 с.
8. : ГОСТ Р 50345–2010 (МЭК 60898-1:2003). Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения.– Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 119 с.
9. Электрические и электронные аппараты : учебник / Ю. К. Розанов, А. А. Акимов, Н. А. Алешин и др. ; под ред. Ю. К. Розанова. – М. : Информэлектро, 2001. – 424 с.
10. Максимов, А. Н. Городской электротранспорт: Троллейбус : учебник / А. Николаевич М.. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

11. Загайнов, Н. А. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса : учебник для техникумов / Н. А. Загайнов, Б. С. Финкельштейн, Л. Л. Кривое ; под ред. Н. А. Загайнова. – 4-е изд., перераб. и доп.– М. : Транс-порт, 1988. – 327 с.

12. Электромобиль: Техника и экономика / В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Центер, В. А. Богомазов ; под общ. ред. В. А. Щетины. – Ленинград : Машиностроение : Ленингр. отд-ние, 1987. – 252 с.

13. Смирнов, Ю. А. Силовая электроника электромобилей. Управление инверторной генерацией энергии [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / Ю. А. Смирнов, В. А. Детистов, В. А. Детистов. – СПб. : Лань, 2024.

14. Темкин, И. О. Искусственные нейронные сети в АСУ ТП : учебник / И. О. Темкин, В. Б. Трофимов. – М. : Издательский Дом МИСиС, 2023. – 352 с.

15. Архипов, М. В. Промышленные роботы: управление манипуляционными роботами : учебник для среднего профессионального образования / М. В. Архипов, М. В. Вартанов, Р. С. Мищенко. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2025. – 170 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ	4
1.1. Базовые понятия производства и распределения энергии	4
1.2. Структура электроэнергетической системы	17
2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ – УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ И КОММУТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ	41
3. ТРОЛЛЕЙБУСЫ И ТРАМВАИ – ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	55
4. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ: АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ	66
5. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ПОТРЕБИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	70
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	78

Учебное электронное издание

ЩЕГОЛЬКОВ Александр Викторович
КОБЕЛЕВ Александр Викторович

ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Редактирование Е. С. Мордасовой
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная
Обложка, упаковка, тиражирование Е. С. Мордасовой

ISBN 978-5-8265-3028-3



Подписано к использованию 29.04.2026.
Тираж 50 шт. Заказ № 65

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5,
помещение 2, к. 14
Телефон (4752) 63-81-08
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru