

**РОСЖЕЛДОР**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

---

Н. А. Попова, А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая

**СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Учебно-методическое пособие

Ростов-на-Дону  
2019

УДК 621.331(07) + 06

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Л. Л. Замшина

**Попова, Н. А.**

Системы электроснабжения электрического транспорта: учебно-методическое пособие / Н. А. Попова, А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2019. – 30 с.

Рассмотрены системы электроснабжения электрического транспорта.

Предназначено для обучающихся всех форм обучения по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» профиля «Электроснабжение железных дорог» при изучении дисциплины «Транспортная энергетика», «Системы электроснабжения электрического транспорта», «Электроснабжение и электропитание транспортных и промышленных предприятий», «Контактная сеть и линии электропередачи», а также для аспирантов и научных сотрудников, занимающихся проблемами транспорта, для слушателей курсов повышения квалификации и переподготовки, для самостоятельной работы обучающихся.

Одобрено к изданию кафедрой «Автоматизированные системы электроснабжения».

© Попова Н. А., Быкадоров А. Л.,  
Заруцкая Т. А., 2019  
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 История энергетики .....	4
2 Принципы и особенности электрификации страны .....	9
3 Этапы электрической тяги .....	12
4 Понятие о системах электроснабжения .....	15
5 Структура электроснабжения железной дороги .....	24
6 Три категории обеспечения надежности электроснабжения .....	26
Библиографический список .....	29

# 1 ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

## 1.1 Промышленное применение электроэнергии

Одной из крупнейших проблем, решенных в конце XIX – начале XX вв, было получение и использование электроэнергии – новой энергетической основы промышленности и транспорта.

Переход к массовому, непрерывному и автоматизированному производству требовал перевода системы машин на новый двигатель. Им стал электропривод, (электромотор), обеспеченный соответствующей передачей электроэнергии от генератора.

Предпосылкой для решения этой технической проблемы стало изобретение итальянским физиком А. Пачинотти (1841–1912) в 1860 г. и независимо от него бельгийским мастером З. Т. Граммом (1826–1901) в 1869–1870 гг. динамомашин, т. е. самовозбуждающегося генератора постоянного тока. Именно благодаря конструкции, предложенной Граммом, изобретение получило распространение на практике.

Генераторами называют электрические машины, преобразующие механическую энергию в электрическую. Принцип действия электрического генератора основан на использовании явления электромагнитной индукции, которое состоит в следующем. Если в магнитном поле постоянного магнита перемещать проводник так, чтобы он пересекал магнитный поток, то в проводнике возникнет электродвижущая сила (ЭДС), называемая ЭДС индукции (Индукция от латинского слова *inductio* – наведение, побуждение), или индуктированной ЭДС. Электродвижущая сила возникает и в том случае, когда проводник остается неподвижным, а перемещается магнит. Явление возникновения индуктированной ЭДС в проводнике называется электромагнитной индукцией. Если проводник, в котором индуктируется ЭДС, включить в замкнутую электрическую цепь, то под действием ЭДС по цепи потечет ток, называемый индуктированным током.

## 1.2 Первые попытки передачи электроэнергии на расстояние

Произведенную электроэнергию не хранят, а сразу передают потребителям.



Рис. 1. Схема передачи электроэнергии

Первые опыты передачи электрической энергии на расстояние относятся к самому началу 70-х годов. В 1873 г. на Венской международной выставке французский электрик И. Фонтен демонстрировал обратимость электрических машин. Одна из машин Грамма работала в режиме генератора, а такая же вторая – в режиме двигателя. Последняя машина приводила в действие водяной насос искусственного водопада. Желая несколько снизить мощность двигателя (чтобы вода не выбивалась за пределы бассейна), Фонтен решил увеличить сопротивление проводов, соединявших две машины. Для этого он включил между машинами барабан с кабелем длиной несколько больше 1 км. Так была показана возможность передачи электроэнергии на более или менее значительное по представлениям того времени расстояние. Вместе с тем сам Фонтен не был убежден в экономической целесообразности электропередачи. В 70-х годах был исследован первый путь, так как увеличение сечения проводников представлялось мероприятием, по-видимому, более естественным и технически легче осуществимым по сравнению с повышением напряжения.

#### *Опыты по передаче электрической энергии Пироцкого*

В 1874 г. русский военный инженер Ф. А. Пироцкий пришел к выводу об экономической целесообразности производства электрической энергии в тех местах, где она может быть дешево получена благодаря наличию топлива или гидравлической энергии, и передачи ее по линии к более или менее отдаленному месту потребления. В том же году он приступил к опытам передачи энергии на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга), используя электрическую машину Грамма. Дальность передачи в опытах Пироцкого составляла сначала более 200 м, а затем была увеличена примерно до 1 км. Для уменьшения потерь в линии Пироцкий предлагал использовать в качестве проводников железнодорожные рельсы, сечение которых более чем в 600 раз превышало сечение обыкновенного телеграфного провода. Стремясь проверить свои выводы, он в конце 1875 г. произвел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействовавшей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,4 км. Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, второй – обратным проводом. Электрический ток шел от небольшого генератора Грамма к электродвигателю, удаленному на расстояние около 1 км.

Необходимо отметить, что Пироцкий был не единственным электротехником, ставшим на путь увеличения сечения проводов. Так, например, В. Сименс, посетив в 1876 г. Ниагарский водопад, сумел правильно оценить энергетические возможности его использования, но утверждал, что для передачи энергии водопада на расстояние 50 км потребуется проводник диаметром 75 мм. Подобные выводы являлись наглядным выражением уровня познаний в области электротехники в 70-х годах XIX в. Несмотря на нерациональность практического направления, избранного Пироцким, его опыты привлекли внимание к вопросам электропередачи вообще, вызвали ряд новых исследований, приведших к выявлению правильного пути для решения этой проблемы. Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи

электрической энергии на расстояние нашло свое применение уже при разработке первых проектов городских электрических железных дорог.

#### *Передача с помощью повышения напряжения*

Другой путь решения проблемы передачи электрической энергии, основанный на повышении напряжения линии передачи, – путь прогрессивный – был избран французским академиком **М. Дебре** и профессором физики Петербургского лесного института **Д. А. Лачиновым**.

Большая заслуга в практическом решении вопросов передачи энергии постоянным током на значительные расстояния принадлежит М. Дебре. Исходя из ранее разработанных принципов, Дебре в 1882 г. строит первую линию электропередачи Мисбах – Мюнхен протяженностью 57 км.

Дальнейшее развитие передачи электрической энергии на расстояние связано с именем М. О. Доливо-Добровольского, который в 1888 г. изобрел систему трехфазного переменного тока. В 1891 г. Доливо-Добровольский вместе с инженером Броуном организовал передачу электроэнергии на расстояние 170 км от Лауфена-на-Некаре до Электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне. Это событие можно считать началом зарождения использования трехфазного тока, вызвавшего переворот в промышленности, транспорте и быту. В 1892 г. электропередача трехфазного тока была осуществлена в Швейцарии и Германии, а в 1893 – в США. Первая промышленная установка трехфазного тока в России была построена в 1893 г. для Новороссийского элеватора. Решение вопроса об электропередаче на значительные расстояния на основе практического использования системы трехфазного переменного тока позволило сконцентрировать производство электроэнергии на особых предприятиях – электростанциях, где в качестве первичных генераторов служили тепловые или водяные двигатели. Следует заметить, что сооружение первых электрических станций относится к концу 70-х – началу 80-х гг. Эти электростанции (блок-станции, как их тогда называли), производившие постоянный ток, могли обеспечить ограниченное число потребителей, осветить небольшие районы города. Именно в этом крылся недостаток использования постоянного тока.

В 80-х гг. начали строить электрические станции переменного тока, которые позволили расширить область применения электроэнергии. В 1884 г. в Англии была пущена первая электростанция переменного тока. В 1889 г. вблизи Портленда (США) была построена крупная гидростанция однофазного переменного тока мощностью 720 кВт. В конце 90-х гг. для снабжения электроэнергией промышленных районов и городов развернулось широкое сооружение районных электростанций, строившихся вблизи источников сырья или у рек.

В 1896 г. вступила в строй первая районная гидроэлектростанция на Ниагаре.



Рис. 2. Первая районная гидроэлектростанция на Ниагаре

На станции были установлены три турбины переменного тока по 5 тыс. л. с. каждая. Динамо-машины вырабатывали ток в 2 тыс. В. Для передачи электроэнергии потребителю напряжение поднималось трансформаторами до 50 тыс. В. Электропередача осуществлялась на расстояние до 550 км. В начале столетия была открыта мощная гидроэлектростанция в Швейцария напряжением 7,7 тыс. В. После прохождения трехфазного тока через трансформаторы он повышался до 50 тыс. В и передавался на расстояние 400 км.

Идеи сооружения гидроэлектростанций в России зародились 70-е гг. XIX в. Первая промышленная гидроэлектростанция в России мощностью 300 кВт была построена в 1895–1896 гг. под руководством инженеров В. Н. Чиколева и Р. Э. Классона (1868–1926) для электроснабжения Охтинского порохового завода в Петербурге. В 1899 г. были введены в эксплуатацию гидроэлектростанции на Бакинских нефтяных камнях и на кавказском курорте Боржоме. В 1903 г. была пущена электростанция «Белый уголь» в Ессентуках. В 1909 г. закончилось строительство крупнейшей в дореволюционной России Гиндукушской ГЭС мощностью 1350 кВт на реке Мургаб (ныне территория Туркменской ССР). В 1914 г. для электроснабжения Москвы в Богородске (ныне Ногинск) была построена самая крупная в мире теплоэлектростанция «Электропередача», работавшая на торфе.



Рис. 3. Теплоэлектростанция «Электропередача»

В результате сооружения районных электростанций промышленные предприятия были избавлены от необходимости строить собственные мелкие электростанции или устанавливать свои электрогенераторы.

Электростанции производили электрический ток специально для продажи потребителям. В 80-е годы возникли первые центральные станции, они были более целесообразны и более экономичны, чем блок-станции, так как снабжали электричеством сразу много предприятий. В то время массовыми потребителями электроэнергии были источники света – дуговые лампы и лампы накаливания. Первые электростанции Петербурга вначале размещались на баржах у причалов рек Мойки и Фонтанки. Мощность каждой станции составляла примерно 200 кВт. Первая в мире центральная станция была пущена в работу в 1882 году в Нью-Йорке, она имела мощность 500 кВт. В Москве электрическое освещение впервые появилось в 1881 году, уже в 1883 году электрические светильники иллюминировали Кремль. Специально для этого была сооружена передвижная электростанция, которую обслуживали 18 локомотивов и 40 динамо-машин. Первая стационарная городская электростанция появилась в Москве в 1888 году.





Рис. 4. Первая стационарная городская электростанция появилась в Москве

Нельзя забывать и о нетрадиционных источниках энергии. Предшественница современных ветроэлектростанций с горизонтальной осью имела мощность 100 кВт и была построена в 1931 году в Ялте. Она имела башню высотой 30 метров. К 1941 году единичная мощность ветроэлектростанций достигла 1,25 МВт.

## **2 ПРИНЦИПЫ И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СТРАНЫ**

В России создавались электростанции в конце XIX и начале XX веков, однако, бурный рост электроэнергетики и теплоэнергетики в 20-е годы XX столетия после принятия по предложению В. И. Ленина плана ГОЭЛРО (Государственной электрификации России). 22 декабря 1920 года VIII Всероссийский съезд Советов рассмотрел и утвердил Государственный план электрификации России – ГОЭЛРО, подготовленный комиссией, под председательством Г. М. Кржижановского. План ГОЭЛРО должен был быть реализован в течении десяти-пятнадцати лет, а его результатом должно было стать создание «крупного индустриального хозяйства страны». Для экономического развития страны это решение имело огромное значение. Недаром свой профессиональный праздник российские энергетики отмечают именно 22 декабря.

В плане много уделялось проблеме использования местных энергетических ресурсов (торфа, воды рек, местного угля и др.) для производства электри-

ческой энергии. 8 октября 1922 года состоялся официальный пуск станции «Уткина заводь» – первой торфяной электростанции в Петрограде.

В 1925 году запустили Шатурскую электростанцию на торфе, в тот же год на Каширской электростанции начали освоение новой технологии сжигания подмосковного угля в виде пыли.



Рис. 5. Шатурская электростанция

Днем начала теплофикации в России можно считать 25 ноября 1924 года – тогда заработал первый теплопровод от ГЭС-3, предназначенный для общего пользования в доме номер девяносто шесть на набережной реки Фонтанки. Электростанция № 3, которую переоборудовали для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, является первой в России теплоэлектроцентралью, а Ленинград – пионером теплофикации. Централизованное снабжение горячей водой жилого дома функционировало без сбоев, и через год ГЭС-3 стало снабжать горячей водой бывшую Обуховскую больницу и бани, находящиеся в Казачьем переулке. В ноябре 1928 года к тепловым сетям государственной электростанции № 3 подключили здание бывших Павловских казарм, располагавшихся на Марсовом поле. В 1926 году была пущена в эксплуатацию мощная Волховская ГЭС, энергия которой по линии электропередачи напряжением 110 кВ, протяженностью 130 км поступала в Ленинград.

20 декабря 1951 года, ядерный реактор впервые в истории произвел пригодное для использования количество электроэнергии – в нынешней Национальной Лаборатории INEEL Департамента энергии США. Реактор выработал

достаточную мощность, чтобы зажечь простую цепочку из четырех 100-ваттных лампочек. После второго эксперимента, проведенного на следующий день, 16 участвовавших в нем учёных и инженеров «увековечили» свое историческое достижение, написав мелом свои имена на бетонной стене генератора.

Советские ученые приступили к разработке первых проектов мирного использования атомной энергии ещё во второй половине 1940-х годов. А 27 июня 1954 года в городе Обнинск была запущена первая атомная электростанция.



Рис. 6. Атомная электростанция, г. Обнинск

Пуск первой АЭС ознаменовал открытие нового направления в энергетике, получившего признание на 1-й Международной научно-технической конференции по мирному использованию атомной энергии (август 1955 г., Женева). К концу XX века в мире насчитывалось уже более 400 атомных электростанций.

Продолжалось развитие альтернативной энергетики. В сентябре 1985 года состоялось пробное включение генератора первой солнечной электростанции СССР СЭС-5 в Крыму. Во время постройки Крымской Атомной электростанции близ поселка Щелкино в Крыму ученые СССР пришли к выводу, что будущему объекту понадобится резервный источник питания, и решили провести технический эксперимент.

На круглой площадке диаметром 500 метров была построена солнечная электростанция СЭС-5, остатки которой до сих пор можно увидеть на том месте. Солнечная электростанция относилась к башенному типу. В отличие от крупнейшей в восточной Европе солнечной электростанции «Перово», расположенной под Симферополем, в которой используются фотоэлектрические панели из кристаллов кремния, на СЭС-5 энергия добывалась путем нагрева воды солнечными лучами.



Рис. 7. СЭС-5

Принцип функционирования экспериментальной станции заключался в следующем: в центре круглой площадки располагалась башня высотой 89 метров с резервуаром воды. Вокруг башни располагались подвижные параболические зеркала – гелиостаты (всего 1600 штук, каждый площадью 25 кв. м), фокусирующие отраженные лучи на резервуаре. Вода в контейнере закипала, превращаясь в пар, который вращал турбину генератора, превращая таким образом солнечную энергию в электричество. Движением зеркал, с тем чтобы они всегда были направлены в нужную сторону, управляла ЭВМ с настраиваемым программным алгоритмом. Мощность станции, ввиду экспериментальности и слабого развития технологий, составляла не более 5 МВт, что, тем не менее, было четвертой частью всей солнечной электроэнергии, вырабатываемой в мире.

### **3 ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

Первая электрическая железная дорога демонстрировалась в 1879 г в Германии на промышленной выставке. Электровоз мощностью 2,2 кВт перевозил три вагончика с 18 пассажирами.



Рис. 8. Первая электрическая дорога на Берлинской выставке



Рис. 9. Копия первого электровоза фирмы «Сименс и Хальске» (1879 г.) в музее Германских железных дорог в Нюрнберге

Питание электровоз получал от специального, третьего рельса с напряжением 150 В. Этот принцип передачи энергии наряду с подводом ее при помощи контактного провода существует и до сих пор, в частности на метрополитенах. С 1900 года начинается бурное развитие электрических железных дорог.

Первой в мире была электрифицирована железная дорога на постоянном токе в 1895 году Балтимор – Огайо протяженностью 115 км с напряжением в контактной сети 675 В постоянного тока. Линия состояла из открытого участка длиной 6,4 км и подземного в черте города. Электровозы для нее поставлялись компанией General Electric.

Первая в мире магистральная железная дорога на электрической тяге между Балтимором и Огайо (Baltimore Belt Line) 1895 г.

21 декабря 1921 года в соответствии с Планом Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО) правительством были установлены конкретные сроки электрификации страны на 10–15 лет. План включал в себя, наряду с рядом разделов, такие как «Общие задачи транспорта» и «Электрификация железных дорог».

В России в 1926 году начал эксплуатироваться электрифицированный на постоянном токе, напряжением 1,2 кВ участок Баку – Сабунчи – Сураханы. (20 км). В 1940 году напряжение было повышено до 1500 В, а в 1961 участок переведен на напряжение 3000В.

С августа 1929 года на участке Москва – Мытищи был открыт первый в стране электрифицированный пригородный участок железной дороги на постоянном токе напряжением 1500 В.

Общая развернутая длина контактной подвески составляла 45 км. Напряжение в контактную сеть подавалось от двух тяговых подстанций (Москва-3 и Мытищи), штат каждой из которых составлял 30 человек. Арматуру контактной сети и оборудование тяговых подстанций поставляли немецкие фирмы.

Перевод на электрическую тягу данного участка послужил началом технической реконструкции отечественных железных дорог.

В 1932 году был электрифицирован на постоянном токе напряжением 3000В первый в СССР магистральный участок Хашури-Зестафони Закавказской дороги. На этом участке находился Сурамский перевал, имеющий затяжные подъемы крутизной 29 %. Такие подъемы поезд массой 900 т мог преодолеть, если его вели три или даже четыре паровоза.

Электрическая тяга на этом участке позволила заменить три паровоза одним электровозом, поднять скорость движения до 30-36 км/час вместо 12-15 км/час при паровой тяге. Применение рекуперативного торможения обеспечило значительную экономию электроэнергии (до 22 % от потребляемой) и повысило безопасность движения поездов на участке. Затраты на электрификацию окупились за 4,5 года.

29 декабря 1955 года введен в эксплуатацию первый опытный участок электрифицированный на однофазном переменном токе промышленной частоты напряжением 22кВ Ожерелье – Михайлов Московской железной дороги, а в 1959 напряжение было повышено до 25 кВ.

### ***Основные этапы электрификации***

1926 год – электрифицирован 1-ый участок в СССР – Баку-Сабунчи-Сураханы (18 км);

1929 год – электрификация участка Москва – Мытищи;  
1932 год – электрифицирован Сурамский перевал (Грузия);  
1941 год – было электрифицировано 1870 км;  
1941–1945 годы – более 400 км в районе Урала;  
1955 год – выпущен отечественный электровоз переменного тока;  
1956 год – электрифицирован участок на переменном токе Ожерелье – Павелец;  
1956 год – принимается генеральный план электрификации ж.-д. СССР (за 15 лет хотели электрифицировать 40 тыс. км, но не смогли, т. к. не хотели заменять тепловозы электровозами).

На сегодняшний день электрифицированный полигон российских железных дорог составляет 42,9 тыс. км, или 50,3 % от общей протяженности магистралей страны, а развёрнутая длина превышает 118 тыс. км.

Железные дороги России являются уникальным полигоном для проверки и оценки эксплуатационных качеств разных систем электрической тяги. Прежде всего, протяженность электрифицированных линий измеряется десятками тысяч километров, и большая их часть характеризуется высокой грузонапряженностью, предельным использованием провозной и пропускной способности. В настоящее время в нашей стране существуют две системы электрификации железных дорог: постоянного тока напряжением 3,3 кВ и однофазного переменного тока промышленной частоты напряжением 27,5 кВ. В настоящее время в России примерно в равных долях используются обе эти системы.

#### **4 ПОНЯТИЕ О СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В настоящее время в нашей стране существуют две системы электрификации железных дорог: постоянного тока напряжением 3(3,3) кВ и однофазного переменного тока промышленной частоты напряжением 27,5 (25) кВ. В настоящее время в России примерно в равных долях используются обе эти системы.

Первоначально электрификация железных дорог проводилась *по системе постоянного тока*.

Схема питания электрифицированного участка железной дороги постоянного тока показана на рисунке 1.

Питание тяговой сети в большинстве случаев осуществляется от шин 110 (220) кВ через понизительный трансформатор, который обеспечивает снижение напряжения до 10 кВ. К шинам 10 кВ подключен преобразователь, который состоит из тягового трансформатора и выпрямителя. Последний обеспечивает преобразование переменного тока в постоянный напряжением на шинах 3,3 кВ. Контактная сеть подключается к «плюс шине», а рельсы – к «минус шине».

К линии электропередачи трехфазного переменного тока промышленной частоты 50 Гц подключен трансформатор тяговой подстанции, понижающий напряжение до 6,3 кВ. Это напряжение подается на синхронный трехфазный электродвигатель, на валу которого установлен синхронный однофазный генератор с выходным напряжением 5,7 кВ частотой 16 2/3 Гц. Полученное напря-

жение повышается трансформатором до 15 кВ и подается на шины тяговой подстанции. Одна из шин рельсовым фидером соединена с рельсами, а другая через фидерные выключатели с контактной сетью перегона. Контактные сети фидерных зон в этой системе отделены простым по конструкции воздушным промежутком, а не нейтральной вставкой, как в системе напряжением 25 кВ.

На электровозах или моторных вагонах электропоездов при этой системе применяются коллекторные двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, включаемые на напряжение тяговой сети без промежуточного преобразования энергии (не менее, чем два двигателя последовательно). Попарное последовательное соединение позволяет иметь в тяговой сети напряжение, равное 3000 В. При таком напряжении энергия тяговым двигателям передается без изменения уровня напряжения на электровозе. В этой системе электровозы получают наиболее простыми, что и составляет одно из главных ее преимуществ.

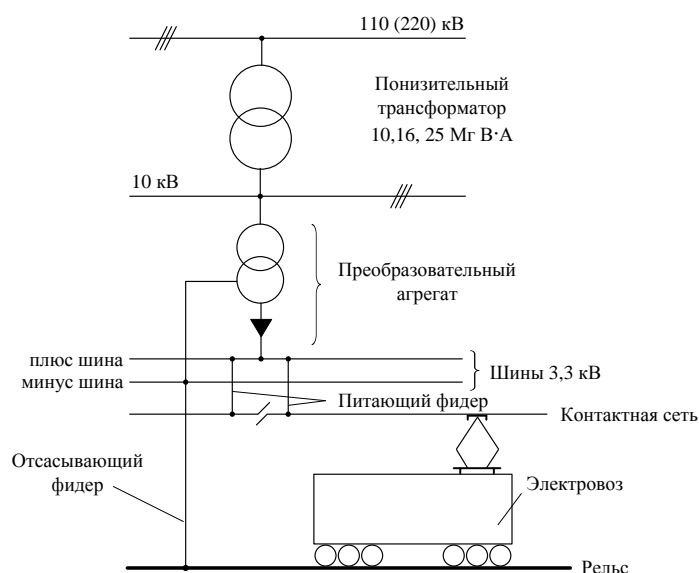


Рис. 10. Принципиальная схема питания электрифицированного участка железной дороги постоянного тока с напряжением в контактной сети 3 кВ

Постоянство потребляемой мощности двигателями электровозов в условиях резко переменного профиля пути и различных весов поездов является важнейшим преимуществом двигателей с последовательным возбуждением, определившим широкое их применение в электрической тяге. Проводились исследования по повышению напряжения в тяговой сети до 4–4,5 кВ при тех же двигателях и по созданию системы постоянного тока 6 кВ. Однако широко распространения эти предложения не получили.

Низкое напряжение в тяговой сети при этой системе ограничивает расстояния между тяговыми до 20 км, а на особо грузонапряженных участках до 15–18 км. Площадь сечения проводов контактной сети в медном эквиваленте в связи с большой мощностью электровозов и низкими напряжением в тяговой сети достигает 400–600 мм<sup>2</sup> на один путь, что примерно в 2–3 раза больше чем



при других системах, а опоры в тяговой сети, на которых подвешиваются эти провода, получаются тяжелыми и дорогими.

При дальнейшем увеличении грузопотоков приходится добавлять подстанции, и тогда расстояние между ними уменьшается вдвое. Большая площадь сечения проводов контактной сети и большее число тяговых подстанций, вызванное относительно невысоким напряжением в тяговой сети, являются существенным недостатком системы постоянного тока.

Следует также отметить, что схема соединений двигателей электровоза постоянного тока получается сложной, так как в процессе пуска двигателя необходимо переключать с последовательного на последовательно-параллельное соединение и вводить пусковые резисторы, в которых непроизводительно расходуется электрическая энергия. Этот недостаток особенно ощутим на электропоездах пригородного сообщения, где потери, связанные с пуском поездов, составляют до 12–15 % общего расхода энергии на тягу поездов.

При системе постоянного тока наблюдается коррозия подземных сооружений, что также можно отнести к существенным недостаткам системы. Для борьбы с этими явлениями разработаны эффективные мероприятия, значительно уменьшающие опасность электрокоррозии подземных сооружений.

Низкое напряжение в тяговой сети этой системы и непрерывно возрастающие мощности электровозов приводят к повышенным потерям энергии и напряжения в тяговой сети, снижению пропускной и провозной способности дороги и определяют необходимость поиска рациональных способов усиления существующей или разработки новых систем постоянного тока. Создание управляемых полупроводниковых преобразователей открыло возможность для разработок и экспериментальных исследований по внедрению системы импульсного преобразования постоянного тока на электровозе, что позволит повысить напряжение в контактной сети до 6 кВ. Разрабатываются также системы с преобразованием постоянного тока контактной сети в трехфазный ток регулируемой частоты при асинхронных двигателях на электровозах.

Стремлением поднять напряжение в контактной сети и исключить из системы электрического питания процесс выпрямления тока объясняется применение и развитие в ряде стран Европы (Германия, Швейцария, Норвегия, Швеция, Австрия) **системы переменного тока** напряжением 15000 В, пониженной частоты  $16 \frac{2}{3}$  Гц. При этой системе на электровозах используют однофазные коллекторные двигатели, имеющие худшие показатели, чем двигатели постоянного тока. Эти двигатели не могут работать на общепромышленной частоте 50 Гц, поэтому приходится применять пониженную частоту. Для выработки электрического тока такой частоты потребовалось построить специальные электростанции, не связанные с общепромышленными энергосистемами. Линии электропередачи в этой системе – однофазные, на подстанциях осуществляется только понижение напряжения трансформаторами. В отличие от подстанций постоянного тока, в этом случае не нужны преобразователи переменного тока в постоянный, в качестве которых применялись ненадежные в эксплуатации, громоздкие и неэкономичные ртутные выпрямители.

**Система однофазного тока промышленной частоты** получила широкое распространение во всем мире. В РФ эту систему применяют с напряжением 25 кВ в тяговой сети.

Принципиальная схема питания электрифицированного участка показана на рис. 11.

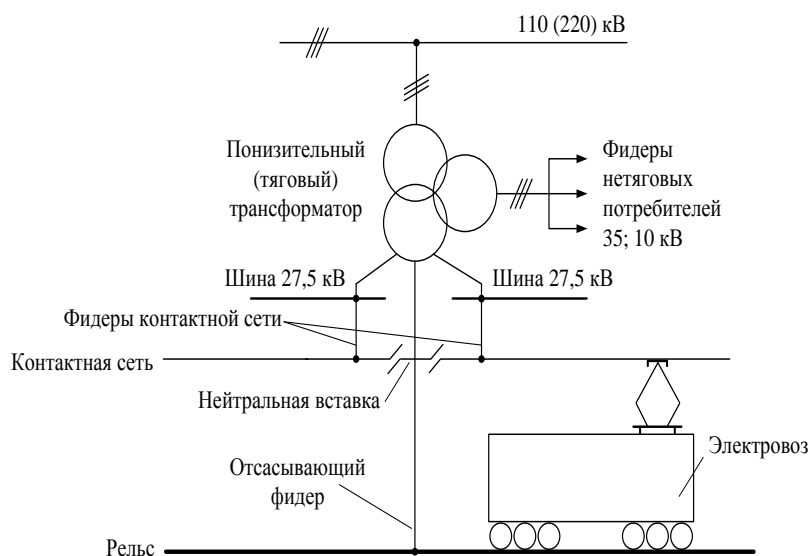


Рис. 11. Принципиальная схема питания электрифицированного участка железной дороги переменного тока напряжением в контактной сети 25 кВ, частотой 50 Гц

Питание тяговой сети осуществляется от шин 110 (220) кВ через понижающий (тяговый) трансформатор. Он имеет три обмотки:

- обмотка высокого напряжения 110 (220) кВ;
- обмотка низкого (среднего) напряжения 27,5 кВ для питания контактной сети;
- обмотка среднего (низкого) напряжения 35, 10 кВ для питания районных и нетяговых потребителей.

К шинам 27,5 кВ подключены фидеры контактной сети. При этом фазы А и В питают разные плечи тяговой подстанции. Для разделения фаз на контактной сети устраивается нейтральная вставка. Фаза С подключается к рельсам.

Переход в тяговой сети на переменный ток напряжением 25 кВ вместо постоянного тока напряжением 3 кВ означает, что при одной и той же передаваемой на электровозы активной мощности и увеличенном в два раза расстоянии между подстанциями, тяговый ток и падения напряжения в контактной сети снижаются в 3,3 раза, а потери энергии – в 11 раз.

В большинстве стран в качестве тяговых единиц при системе переменного тока используют электровозы с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением. Для питания этих двигателей на электровозах устанавливают преобразовательные агрегаты, состоящие из понижающих трансформаторов и однофазных полупроводниковых преобразователей.

Тяговые подстанции при этой системе превращаются в простые трансформаторные понижающие подстанции, контактная сеть – в линию электропередачи повышенного напряжения.

Преобразовательный агрегат перемещают с подстанции на электровоз, что, с одной стороны, усложняет электровоз, а с другой стороны, позволяет исключить пусковые резисторы и коммутационную аппаратуру для переключения двигателей при пуске. Двигатели включаются параллельно друг другу. Пуск электровоза обеспечивается регулированием на трансформаторе напряжения, подаваемого на двигатели, без пусковых резисторов. Контактная сеть и опоры оказываются легкими. На тяговых подстанциях устанавливают, как правило, трехобмоточные трансформаторы. Одна из вторичных обмоток таких трансформаторов выполняется напряжением 27,5 кВ и предназначена для питания тяговых нагрузок, а вторая – напряжением 35; 10; или 6 кВ и предназначена для питания районных не тяговых потребителей.

Следовательно, при этой системе электрификация железной дороги удобно совмещается с электрификацией прилегающих к железной дороге районов. При питании однофазной нагрузки от трехфазной районной сети неизбежна различная нагрузка фаз первичной системы электроснабжения. При мощных энергосистемах обычно тяговая нагрузка составляет небольшую долю от всей нагрузки системы. При этом несимметрия тяговой нагрузки не играет существенной роли в нагрузке, однако она вызывает на шинах тяговых подстанций и в питающих их линиях передачи существенную несимметрию напряжения. Несимметрия напряжения оказывает влияние на работу трехфазных потребителей, получающих питание от этих подстанций и линий электропередачи. Значительное влияние тягового тока на линии слабого тока и необходимость принятия дорогостоящих мер защиты уменьшают эффективность от системы переменного тока. Исходя из очевидных преимуществ электрической тяги переменного тока, не случайно в ряде стран начали переводить отдельные «старые» участки с постоянного тока на переменный (Франция, Индия и др.). Примером послужила Россия, где впервые в мировой практике в 1996 г. был осуществлен такой перевод протяженного магистрального участка Транссибирской магистрали Зима–Слюдянка (длина 386 км), работающего в условиях высокой грузонапряженности.

#### *Трехпроводная система тягового электроснабжения переменного тока*

Указанная система является разновидностью системы электроснабжения переменного тока промышленной частоты, поскольку локомотив в этом случае остается таким же. В качестве примера рассмотрим систему тягового электроснабжения переменного тока  $2 \times 25$  кВ частотой 50 Гц. Схема питания электрифицированного участка железной дороги по системе тягового электроснабжения переменного тока  $2 \times 25$  кВ показана на рис. 12.

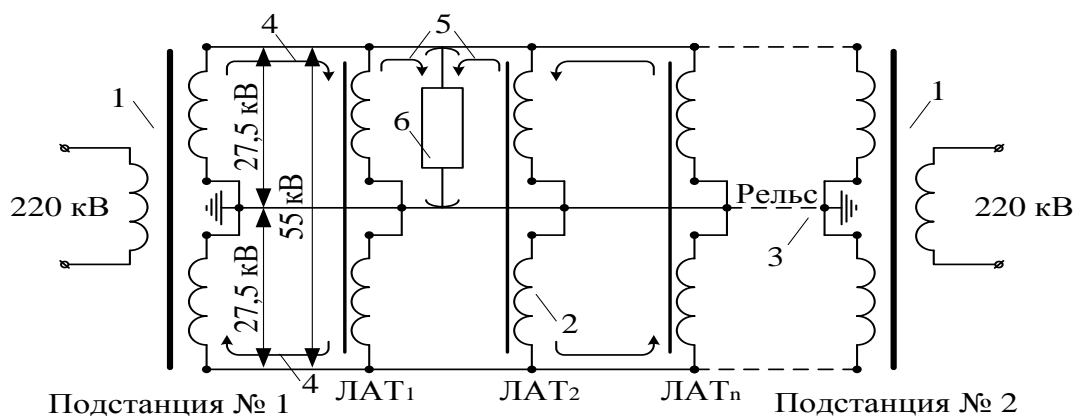


Рис. 12. Схема питания электрифицированного участка железной дороги по системе тягового электроснабжения переменного тока  $2 \times 25$  кВ:

1 – понижительные трансформаторы подстанции № 1 и 2 (однофазные) 220/25 кВ; 2 – линейные автотрансформаторы 50/25 кВ мощностью 16 мВ·А, устанавливаемые между подстанциями через 10–20 км; 3 – подключение рельсов в средней точке понижительного трансформатора и линейного автотрансформатора; 4 – поток мощности при  $U = 50$  кВ; 5 – при  $U = 25$  кВ; 6 – электровоз

Расстояние между подстанциями составляет 60–80 км.

Увеличение скорости сопровождается резким увеличением мощности, необходимой для тяги поездов. Кроме того, мощности на тягу возрастают и по причине тенденции к увеличению весов поездов. В этом случае рассмотренные выше системы не могут обеспечить требуемой нагрузочной мощности, поэтому встает вопрос о поисках путей решения этой проблемы. Одним из таких направлений является система напряжением  $2 \times 25$  кВ. Прототипом этой системы следует считать автотрансформаторную систему 11/44 кВ, которая стала использоваться в США с 1913 г. Ее отличие от описываемой заключается в другом соотношении напряжений между отдельными элементами тяговой сети. В системе 11/44 кВ напряжение в контактной сети 11 кВ, а между питающим проводом и контактной сетью – 44 кВ, в то время как у анализируемой системы соответствующие напряжения равны 25 и 50 кВ. Известно, что потери электроэнергии уменьшаются при увеличении уровня напряжения в ЛЭП в квадратичной зависимости.

Если одну и ту же мощность передавать, например, при вдвое большем напряжении, то потери электроэнергии уменьшатся в четыре раза. Поднять напряжение в контактной сети не позволяет действующий электроподвижной состав, рассчитанный на номинальное напряжение, равное 25 кВ. Однако если с полевой стороны опор контактной сети подвесить однофазную ЛЭП с номинальным напряжением, например 55 кВ, то можно посредством автотрансформаторов отбирать через определенные расстояния электроэнергию из этой линии и передавать ее в контактную сеть, преобразуя в энергию с уровнем напряжения 50 кВ в электроэнергию с уровнем напряжения в контактной сети 25 кВ.

Более того, схема может быть упрощена посредством использования в качестве второго провода такой ЛЭП контактной подвески и заменой трансформаторов автотрансформаторами.

На схеме приведен однопутный участок электрифицированной железной дороги с тремя ТП, расстояние между которыми достигает 100–125 км. На каждой ТП установлено по два силовых трансформатора. Дополнительно система 2×25 кВ включает в себя автотрансформаторы, устанавливаемые на расстоянии 7–25 км, а также питающий провод напряжением 25 кВ.

Система 2×25 кВ широко применяется в Японии и Франции, имеющих электрифицированные линии 25 кВ. В России эта система применена на Московской, Красноярской, Горьковской, Восточно-Сибирской дорогах, а также в Белоруссии.

Питание КП осуществляется с помощью тяговых трансформаторов, установленных на тяговых подстанциях ТП, имеющих первичные обмотки, две одинаковые вторичные обмотки с номинальным напряжением 25 кВ. Эти обмотки соединяют последовательно, а их общая точка подключается к рельсам Р. Вывод одной вторичной обмотки подключается к проводам контактной сети КП, а другой обмотки – к питающему (дополнительному) проводу П, который подвешивается на опорах контактной сети. Таким образом, шины контактной сети и питающего провода находятся под напряжением 25 кВ по отношению к земле, а между ними напряжение равно 50 кВ.

Автотрансформаторы имеют коэффициент трансформации, близкий к двум. Выводы подключают к проводам контактной сети и питающему проводу. Средняя точка автотрансформаторов присоединяется к рельсам.

В автотрансформаторной системе энергия к электровозам подается по цепи: от ТП по проводам контактной сети КП и питающему проводу П к автотрансформаторам АТ при номинальном напряжении 50 кВ. Автотрансформаторы понижают это напряжение до 25 кВ и подают его в КП, от которой питаются электровозы. Таким образом, при движении поезда по участку автотрансформаторы по очереди принимают нагрузку электровоза, но ток его без трансформации течет по тяговой сети только до ближайших автотрансформаторов. На большем расстоянии (от подстанции до автотрансформаторов) ток в тяговой сети вдвое меньше, в результате чего уменьшаются потери напряжения и энергии во всей системе электроснабжения.

Подстанции системы переменного тока 2×25 кВ также получают питание от ЛЭП 110(220) кВ. Основные функциональные узлы тяговой подстанции (рис. 2.9): РУ 110 (220) кВ; понижающие однофазные трансформаторы; ОРУ 2×27.5 кВ; районные трансформаторы; РУ 10(35) кВ для питания нетяговых и районных потребителей железной дороги и сторонних потребителей. Снабжение электрической энергией нетяговых железнодорожных потребителей осуществляется от линий ДПР, напряжение на которые подается через фидеры ДПР, и рельсов, т. е. так же, как и при системе переменного тока напряжением 25 кВ. По вводам трехфазное напряжение 110(220) кВ подается в ОРУ 110(220) кВ. Двухфазными присоединениями к этому РУ подключены одинаковые по кон-

струкции однофазные трансформаторы. Их первичные обмотки включены на междуфазное напряжение. Вторичная обмотка каждого трансформатора состоит из двух секций, напряжение каждой из них 27,5 кВ, при последовательном соединении между выводами а1-х2 напряжение составляет 55 кВ. Впервые трехпроводная система тягового электроснабжения переменного тока была применена в Японии в 1971 г. В странах содружества в 1979 г. был смонтирован первый участок Вязьма – Орша Белорусской железной дороги.

*Преимущества и недостатки системы тяги переменного тока напряжением 2×25 кВ*

Достоинствами существующей системы электроснабжения 2×25 кВ по сравнению с системой переменного тока 25 кВ являются:

- 1) применение стандартного типа ЭПС и обычного силового электрооборудования на тяговой подстанции;
- 2) увеличенное расстояние между подстанциями в 1,5–2,2 раза;
- 3) снижение суммарных потерь энергии в 1,7 – 1,9 раза при одних и тех же расстояниях между подстанциями системы 25 кВ;
- 4) относительно небольшое сечение контактной подвески 250 мм<sup>2</sup> (вместе с питающим проводом);
- 5) пониженное электромагнитное влияние на линии, находящиеся вблизи железных дорог.

К недостаткам этой системы можно отнести:

- 1) усложнение эксплуатации системы тягового электроснабжения из-за дополнительных элементов системы тягового электроснабжения;
- 2) значительное удорожание системы электроснабжения при наличии автотрансформаторов.

В настоящее время по этой системе электрифицировано более 2 тыс. км на Московской, Горьковской и бывшей Байкало-Амурской железных дорогах.

Первые участки электротяговой сети с обратными – экранирующими и усиливающими проводами (ЭУП) появились на железных дорогах однофазного переменного тока частотой 50 Гц еще в конце 70-х годов прошлого столетия. К концу 80-х годов протяженность переоборудованных участков превысила 500 км. Основными задачами, которые решались в то время, были снижение потерь электроэнергии в контактной сети, уменьшение электромагнитных влияний на смежные сооружения и линии связи (примерно в 2 раза), стабилизация уровня напряжения. В 90-е годы такая сеть получила широкое распространение в Европе, в частности широко распространена в Германии.

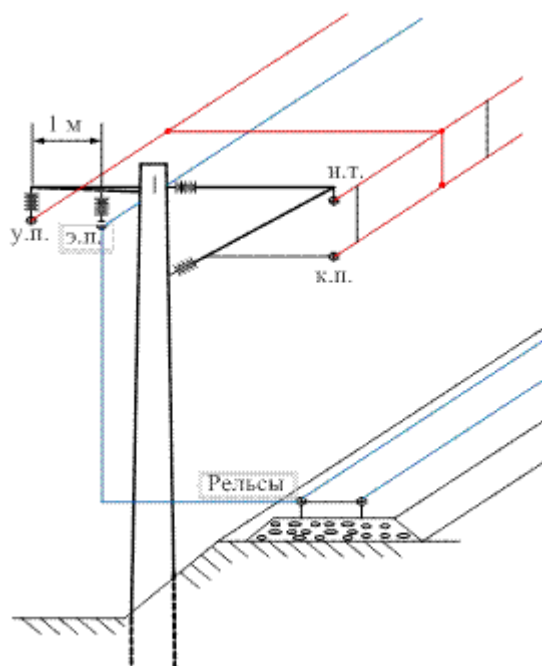


Рис. 13. Схема размещения проводов УЭП

Разработанная в РГУПСе (РИИЖТе) совместно с Северо-Кавказской железной дорогой в 1975 г. эта система в дальнейшем была усовершенствована сотрудниками ВНИИЖТа, МИИТа, Трансэлектропроекта. В 1990 г. было оборудовано системой ЭУП 560 км на Северо-Кавказской и Горьковской железных дорогах. Опыт эксплуатации подтверждает достоинства системы. Особенно велика эффективность системы ЭУП для высокоскоростных магистралей. С начала 90-х гг. XX в. такая система стала использоваться за рубежом (Германия, Испания). Особенно интенсивно она внедряется в Германии на линиях Ганновер–Вюрцбург и Мангейм–Штутгарт с высокоскоростными экспрессами ICE. В 2003 г. по системе ЭУП электрифицировано более 200 км Дальневосточной железной дороги. Система (ЭУП) для железных дорог России выгодна не только применительно к скоростным пассажирским магистралям (Санкт-Петербург–Москва и др.), но и как энергосберегающая – на железных дорогах с грузовым движением.

Система электроснабжения на переменном токе характеризуется проявлением значительной индуктивности воздушных линий, в том числе и тяговой сети. Это приводит к заметным потерям напряжения и потерям электрической энергии от подстанций до электроподвижного состава. Уровень напряжения снижается и в ряде случаев не обеспечивает соблюдение требований нормативных документов, регламентирующих уровень напряжения на токоприемниках электроподвижного состава дорог переменного тока не менее 21 кВ. Этому показателю уделяется большое внимание, поскольку уровень напряжения определяет пропускную способность электрических железных дорог.

Основная идея рассматриваемой системы заключается в том, чтобы часть возвращаемого от ЭПС к подстанции тока пропускать по дополнительному

экранирующему проводу. Тем самым уменьшается величина блуждающих токов (токи, протекающие в земле), так как увеличивается суммарное сечение обратного проводника (рельсы, экранирующий провод). Экранирующий провод располагают как можно ближе к подвеске контактной сети, для чего используют усиливающий провод, который имеет одинаковый потенциал с подвеской контактной сети.

Экранирующий и усиливающий провода расположены на минимально допустимом расстоянии 1 м. Это способствует уменьшению индуктивного сопротивления, поскольку магнитное поле контактной подвески максимально компенсируется магнитным полем экранирующего провода, ток в котором протекает в противоположном направлении. Схема системы тяги с экранирующим усиливающим проводом приведена на рис. 13. Вторым преимуществом этой системы является малое электромагнитное влияние на смежные электрические линии.

#### *Особенности системы ЭУП*

Расстояние между подстанциями составляет 70–80 км. На опоре контактной сети дополнительно размещаются с полевой стороны два провода: экранирующий (ЭП) и усиливающий (УП). УП подключен к фидеру тяговой подстанции и соединяется с контактной подвеской параллельно через каждые 200–250 м. ЭП подключен к контуру заземления тяговой подстанции и соединяется с рельсами через каждые два изолированных стыка (ИС) на третьем (рельсовые цепи сигнализации отделены друг от друга изолирующими стыками).

## **5 СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

Поступление электрической энергии на железную дорогу (рис.14) осуществляется в пунктах ее приема (ПП). Такими пунктами являются тяговые подстанции (ЭЧЭ), центральные распределительные подстанции (ЦРП), трансформаторные подстанции (ТП). Электроэнергия также может поступать отраслевым предприятиям железнодорожного транспорта от трансформаторных подстанций низкого напряжения (ПП НН), принадлежащих энергосистемам и промышленным предприятиям.

Контактная сеть, линия СЦБ, все ЛЭП передают электроэнергию от тяговой подстанции конкретному потребителю. Трансформаторная подстанция питает потребителя по специальной линии электропередачи.

Потребители электрической энергии подразделяются на два типа – предприятия железнодорожного транспорта и посторонние железнодорожному транспорту. Структура потребления электрической энергии на железной дороге представлена на рис. 14.





Рис. 14. Потребление электрической энергии на железной дороге

Предприятия железнодорожного транспорта обеспечивают потребление электрической энергии на тягу поездов и на нетяговые нужды. К последним относится обеспечение эксплуатационной работы и подсобно-вспомогательной деятельности. Эксплуатация включает в себя потребление электрической энергии, связанное с перевозочным процессом и с прочими производственными нуждами. Подсобно-вспомогательная деятельность предполагает потребление электрической энергии на производство промышленной продукции, коммунально-бытовое и др.

Предприятия, посторонние железнодорожному транспорту, могут быть самые разнообразные: промышленные, сельскохозяйственные, для оказания услуг населению и пр.

Вся совокупность устройств, начиная от генератора электрической станции и кончая тяговой сетью, линиями электропередач, составляет систему электроснабжения железной дороги, обеспечивающую питание электрической энергией как электрической тяги, так и нетяговой нагрузки.

Основной задачей системы электроснабжения является обеспечение эксплуатационной работы железной дороги. При этом необходимо обеспечить мощность всех элементов системы такой, чтобы удовлетворялась потребность мощности каждого локомотива в любых условиях работы. Отсюда следует, что параметры системы электроснабжения должны быть выбраны так, чтобы обеспечивалась работа оборудования в допустимых для него пределах по нагрузке с учетом соответствующего резерва. При этом затраты должны быть минимальными.

Питание различных стационарных потребителей, а также прилегающих к железной дороге районов осуществляется от одной и той же системы электроснабжения. При этом питание железнодорожных потребителей связано с работой конкретного участка железной дороги и поэтому должно обеспечиваться высокой надежностью.

## **6 ТРИ КАТЕГОРИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

По надежности электроснабжения электроприемники ж.-д. транспорта разделяются на три категории. К 1-й категории относятся электроприемники, (например, пост электрической централизации) перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, срыв графика движения поездов, принести значительный ущерб ж.-д. транспорту и экономике страны в целом.



Рис. 15. Пост электрической централизации (ЭЦ), ст. Заречная СКЖД

Из 1-й категории выделяется особая группа электропотребителей, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного движения поездов, предотвращения угрозы жизни людей, пожаров и исключения большого ущерба экономике страны. Ко 2-й категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к нарушению производственного цикла и массовым простоям рабочих энергоемких предприятий.



Рис. 16. Ж/д вокзал (потребитель 2-й категории)

К 3-й категории относятся все остальные электроприемники. Электропитание потребителей 1-й категории должно обеспечиваться от двух независимых источников питания и перерыв его может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания. Для потребителей особой группы должно быть предусмотрено питание от третьего независимого источника. Электроприемники 2-й категории рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых источников питания, при отказе одного из которых допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения второго дежурным персоналом или выездной бригадой. Допускается питание от одной воздушной линии, в т. ч. с кабельной вставкой, если обеспечена возможность восстановления этой линии не более, чем за одни сутки. Кабельные вставки должны выполняться двумя кабелями, каждый из которых выбирается по длительно допустимой нагрузке линии. Допускается также питание по линии, состоящей не менее, чем из двух кабелей, присоединенных к одному общему аппарату. При наличии централизованного резерва трансформаторов и возможности замены поврежденного трансформатора не более, чем за одни сутки, допускается питание приемников 2-й категории от одного трансформатора.

Электропитание электроприемников 3-й категории может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения в случае повреждения не превышают одних суток. В соответствии с ОСТ 32.14-80 к особой группе 1-й категории относятся следующие потребители: центральный пост диспетчерской централизации (ДЦ), пост электрической централизации (ЭЦ) станций с числом стрелок более 30, узел связи. Среди электроприемников 1-й категории – автоматическая и полуавтоматическая блокировка, пост ЭЦ с числом стрелок до 30, механизированная и автоматизированная сортировочная горка, пункт обнаружения нагрева букс, вокзал вместимостью бо-

лее 300 чел. и др. К потребителям 2-й категории относятся устройства громкоговорящей связи, наружного освещения путей горловины парков приема и отправления станций первого и второго классов, механический цех депо и др. В 3-ю категорию входят производственные базы дистанций, мастерские, контрольно-испытательный пункт СЦБ и др.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Правила устройства электроустановок. – Москва : Главэнергонадзор, 2000. – 607 с.
- 2 **Чернов, Ю. А.** Электроснабжение железных дорог: учебное пособие / Ю. А. Чернов. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 406 с.
- 3 Электрические железные дороги : учебное пособие / Под редакцией Ю. Е. Просвинова, В. П. Феоктистова. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2010.
- 4 Электроснабжение нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Устройство, обслуживание, ремонт : учебное пособие / Под редакцией В. М. Долдина. – Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 304 с.

*Учебное издание*

**Попова** Наталия Андреевна  
**Быкадоров** Александр Леонович  
**Заруцкая** Татьяна Алексеевна

**СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Печатается в авторской редакции  
Технический редактор К. И. Гамзаева

Подписано в печать 30.12.2019. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,86. Тираж экз. Изд. № 50129. Заказ .

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, д. 2, [www.rgups.ru](http://www.rgups.ru)