

А. Д. Зарубин¹, Л. А. Астраханцев¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск

АНАЛИЗ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Проведен обзор основных систем тягового электроснабжения, выделены их различия, преимущества и недостатки. Рассмотрены основные методы устранения недостатков систем.

Основными недостатками системы постоянного тока напряжения 3 кВ являются потери электрической энергии, связанные с низким уровнем напряжения в контактной сети и большим токопотреблением электроподвижного состава (ЭПС), большим расходом цветных металлов и дороговизной системы.

Основными недостатками систем переменного тока напряжения 1х25 кВ и 2х25 кВ являются несимметричность нагрузки симметричной системы внешнего электроснабжения, искажение форм кривых тока в тяговой сети, усложнение конструкции ЭПС и снижение его надежности, неполное использование напряжения системы электроснабжения для электрической тяги и неудовлетворительный коэффициент полезного действия.

Решение данных проблем требует поиска современных инженерных решений и существенных материальных, финансовых вложений.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, система внешнего электроснабжения, электроподвижной состав, силовой трансформатор.

A. D. Zarubin¹, L. A. Astrakhansev¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk

ANALYSIS OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

Annotation. The review of the main traction power supply systems is carried out, their differences, advantages and disadvantages are highlighted. The main methods of eliminating the shortcomings of systems are considered.

The main disadvantages of a 3 kV direct current system are losses of electrical energy associated with a low voltage level in the contact network and high current consumption of electric rolling stock (ERS), high consumption of non-ferrous metals and high cost of the system.

The main disadvantages of AC systems with a voltage of 1x25 kV and 2x25 kV are the asymmetry of the load of the symmetrical external power supply system, distortion of the curves current in the traction network, the complication of the EPS design and a decrease in its reliability, and incomplete use of the power of power transformers.

The solution of these problems requires the search for modern engineering solutions and significant material investments.

Keywords: traction power supply system, external power supply system, electric rolling stock, power transformer.

Введение

Система электроснабжения железной дороги выполняет функцию обеспечения электроэнергией тягового подвижного состава и различных предприятий необходимых для полного функционирования транспортной системы. Электроэнергия поступает либо от внешних (региональных) источников питания, либо от собственных источников отрасли.

Электроподвижной состав (ЭПС) является основным тяговым потребителем электроэнергии в железнодорожной транспортной системе. Его питание осуществляется с помощью нескольких структурно одинаковых схем внешнего и тягового электроснабжения.

В систему внешнего электроснабжения входит источник электрической энергии (электростанция), трансформаторная подстанция и линия электропередачи. В систему тягового электроснабжения входит тяговая подстанция, питающая линия, контактная сеть, тяговые рельсы и отсасывающая линия [1-6].

На данный момент в России применяются три основные тяговые системы электроснабжения:

– Система тягового электроснабжения электрической тяги постоянного тока напряжением 3 кВ [7];

- Система переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц с напряжением в контактной сети 25 кВ [8];
- Система переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц с напряжением в тяговой сети 2х25 кВ [9].

Анализ систем тягового электроснабжения, их основные отличия, достоинства и недостатки, возможные пути устранения проблем [10-15].

1 Система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ

Питание осуществляется от шин внешнего электроснабжения 110(220) кВ. Понижительный трансформатор изменяет уровень напряжения до 10 кВ. К шинам 10 кВ подключен преобразовательный агрегат, который состоит из тягового трансформатора и выпрямителя. Выпрямитель служит для преобразования переменного тока и напряжения в постоянный по направлению и пульсирующий по величине ток и напряжение величиной 3,3 кВ. Контактная сеть подключается к «шине плюс», а рельсы – к «шине минус».

Принципиальная схема подстанции постоянного тока приведена на рис. 1.

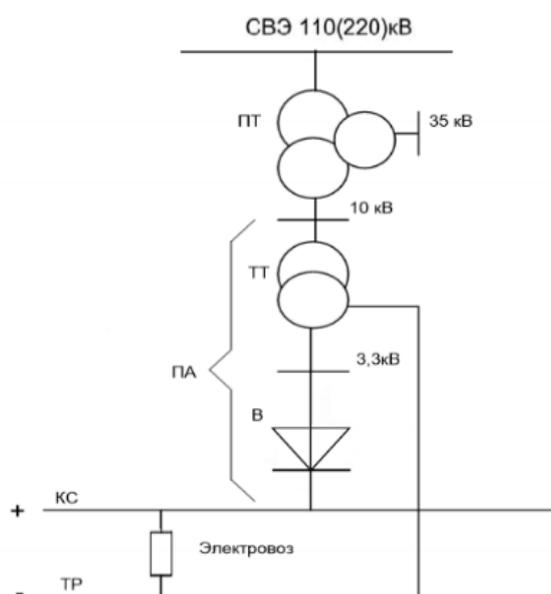


Рис. 1. Принципиальная схема подстанции постоянного тока 3 кВ

Преимущества системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ.

- 1) Возможность качественного регулирования скорости ЭПС по ходу движения;
- 2) Отсутствие выпрямительного устройства на ЭПС упрощает его конструкцию и увеличивает надежность;
- 3) Тяговая нагрузка постоянного тока для трехфазной сети внешнего электроснабжения является симметричной нагрузкой, в связи с чем, отсутствует несимметрия токов и напряжений во внешней сети;
- 4) Высокая электромагнитная совместимость;
- 5) Более эффективная рекуперация;
- 6) Отсутствие реактивных потоков в тяговой сети и, вследствие этого, исключение необходимости использования средств компенсации реактивной мощности.

Недостатки системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ.

- 1) Значительная величина токопотребления электровозом приводит к значительным активным потерям (12-15%) и падению напряжения на электровозе;
- 2) Относительно малые расстояния между тяговыми подстанциями (15 км);
- 3) Относительно большее сечение проводов контактной сети, что приводит к увеличению расхода цветных металлов и увеличению нагрузки на опорно-поддерживающие конструкции;

- 4) Использование дополнительного трансформатора в роли промежуточного (понижающего) 110(220)/10 кВ что усложняет конструкцию тяговой подстанции;
- 5) Электрокоррозия подземных сооружений и опор контактной сети;

Способы устранения недостатков.

Основным направлением устранения недостатков системы постоянного тока напряжением 3 кВ является разработка системы тяги повышенного напряжения постоянного тока. Работы профессора Б.А. Аржанникова, Уральский государственный университет путей сообщения; профессора А.Т. Буркова, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I описывают возможные перспективы разработки системы повышенного напряжения 12, 24 кВ. Применение данной системы позволит повысить энергетическую эффективность по симметрированию нагрузки в питающих сетях внешнего электроснабжения, улучшить КПД и электромагнитную совместимость, возможность обеспечивать удовлетворительный токосъем при высокоскоростном движении поездов, а также увеличить пропускную способность железной дороги. Повышение напряжения в контактной сети позволит снизить сечение проводов, что значительно снизит расходы на цветные металлы и монтаж, увеличить расстояние между тяговыми подстанциями и значительно уменьшить потери электроэнергии. Разработка оборудования и его изоляции для повышенного номинала напряжения не имеет инженерных сложностей. Проблема реализации данной системы в создании преобразовательного модуля постоянного-постоянного тока 12(24)/3 кВ для ЭПС постоянного тока.

2 Система тягового электроснабжения переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц с напряжением в контактной сети 25 кВ

Питание осуществляется от шин внешнего электроснабжения 110(220) кВ. Понижительный трансформатор выполняет роль тягового, одна из обмоток трансформатора изменяет уровень напряжения до 27,5 кВ и питает тяговую сеть. Для питания районных потребителей могут использоваться трехобмоточные тяговые трансформаторы, у которых третья обмотка 10(35) кВ предназначенная для питания районных потребителей, либо устанавливают районные трансформаторы 110(220)/10(35) кВ.

Принципиальная схема системы тягового электроснабжения переменного тока 1х25 кВ приведена на рис. 2.

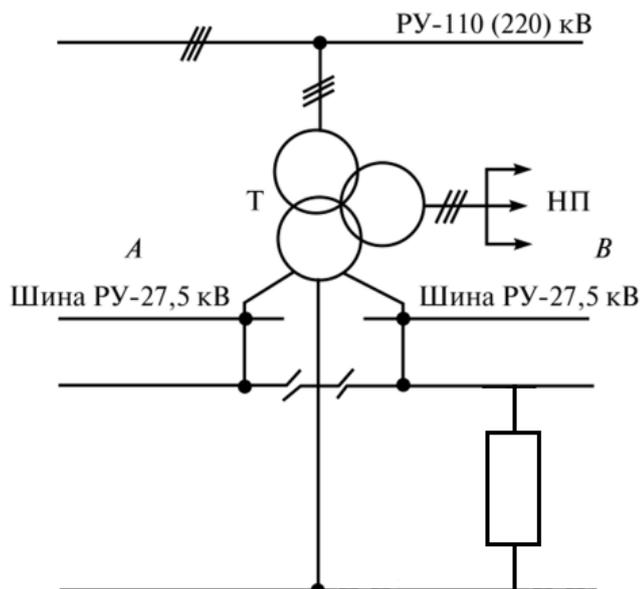


Рис. 2. Принципиальная схема системы тягового электроснабжения переменного тока 1х25 кВ

Основные преимущества системы электроснабжения тяги переменного тока 1х25 кВ по сравнению с системой электроснабжения тяги постоянного тока 3 кВ.

- 1) Увеличение расстояния между подстанциями до 40 – 50 км;

- 2) Уменьшение сечения проводов контактной сети в 2 – 3 раза, что приводит к уменьшению потребления цветных металлов и нагрузки на опорно-поддерживающие конструкции;
- 3) Уменьшение потерь электроэнергии;
- 4) Значительное упрощение конструкций тяговых подстанций;
- 5) Отсутствие электрокоррозии на подземных коммуникациях и опорах контактной сети.

Недостатки системы электроснабжения тяги 1x25 кВ.

- 1) Несимметричное потребление электроэнергии;
- 2) Искажение форм кривых тока и напряжения в тяговой сети;
- 3) Сильное электромагнитное влияние контактной сети;
- 4) Низкий коэффициент мощности из-за большого потребления реактивной мощности;
- 5) Низкая степень использования трансформатора;
- 6) Низкий показатель надежности ЭПС.

3 Система тягового электроснабжения переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц с напряжением в тяговой сети 2x25 кВ

Питание осуществляется от шин внешнего электроснабжения 110(220) кВ. На тяговых подстанциях устанавливаются однофазные трехобмоточные трансформаторы, имеющие обмотки высокого напряжения 110(220) кВ, обмотки среднего напряжения 35(10) кВ, предназначенные для питания районных потребителей и расщепленные обмотки низкого напряжения 27,5 кВ. Расщепленные части обмотки допускают параллельное или последовательное соединение. Регулирование напряжения осуществляется на стороне низкого напряжения в диапазоне $\pm 8\%$ от номинального в каждой из расщепленных частей обмотки. Их общая точка подключена к тяговому рельсу. Вывод одной из обмоток низкого напряжения подключён к контактной сети, а другой к питающему проводу, который подвешивается на опорах контактной сети с полевой стороны. Напряжение между контактной сетью, питающим проводом и рельсом – 27,5 кВ, а между контактной сетью и питающим проводом – 55 кВ. Питание районных потребителей осуществляется по тому же принципу, что и в системе 1x25 кВ. Принципиальная схема системы тягового электроснабжения переменного тока 2x25 кВ приведена на рис. 3.

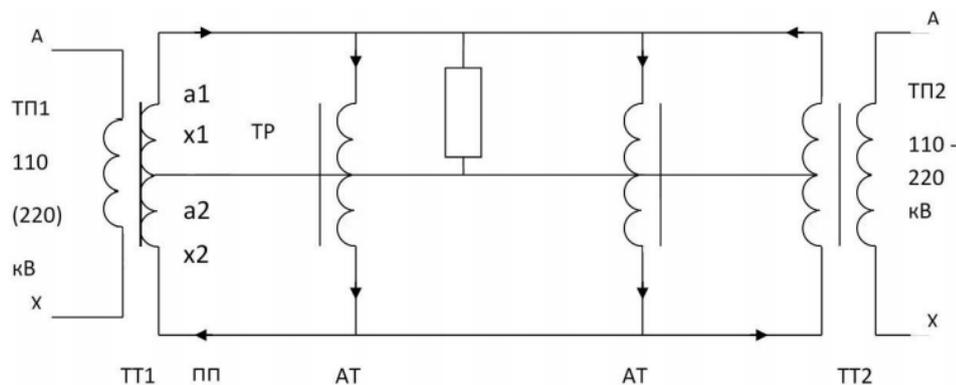


Рис. 3. Принципиальная схема системы электроснабжения 2x25 кВ

Преимущества системы тягового электроснабжения переменного тока 2x25 кВ по сравнению с системой переменного тока 1x25 кВ.

- 1) Снижение суммарных потерь электроэнергии в 1,5 раза;
- 2) Снижается электромагнитное влияние на смежные линии;
- 3) Увеличение расстояния между подстанциями в 1,5 – 2 раза;
- 4) Регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций с помощью устройства РПН трансформатора не зависит от нагрузки смежного плеча, что обеспечивает больший эффект регулирования;
- 5) Применение стандартного типа ЭПС и силового оборудования как на тяговых подстанциях 1x25 кВ.

Недостатки системы 2х25 кВ по сравнению с 1х25 кВ.

- 1) Значительное удорожание системы тягового электроснабжения;
- 2) Необходимость использования дополнительного питающего провода, что увеличивает экономические затраты и нагрузку на опорно-поддерживающие конструкции контактной сети;
- 3) Значительное количество автотрансформаторов в межподстанционной зоне (5 – 7 штук), что приводит к увеличению потерь;
- 4) Увеличенное количество коммутационной аппаратуры 110(220) и 27,5 кВ;
- 5) Затруднение защиты контактной сети и автотрансформаторов от токов короткого замыкания;
- 6) Усложнение эксплуатации;
- 7) Затруднение питания нетяговых потребителей.

Способы устранения недостатков систем переменного тока.

Самые острые проблемы систем переменного тока напряжением 1х25 кВ и 2х25 кВ это несимметричность нагрузки, подключаемой к симметричной системе внешнего питающего электроснабжения, неполное использование мощности силовых трансформаторов тяговых подстанций (68%), значительные уравнительные токи, необходимость компенсации реактивной мощности, необходимость снижения влияния несинусоидальности на работу системы тягового электроснабжения.

Для устранения этих недостатков разработано множество технических и структурных решений:

- Установка трансформаторов с симметрирующими свойствами;
- Включение устройств поперечной и продольной компенсации;
- Использование устройств компенсации реактивной мощности;
- Фазировка подстанций;
- Использование фильтров;
- Установка устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Заключение

Известные методы улучшения работы систем тягового электроснабжения не устраняют проблемы, а лишь частично компенсируют их недостатки. Технические решения усложняют системы и ведут к их удорожанию. Для повышения пропускной способности железной дороги, уменьшения потерь электроэнергии, повышения надежности системы и рационального использования материальных и экономических ресурсов необходима кардинальная модернизация существующих систем или разработка принципиально новых систем тягового электроснабжения. Данная проблема требует слаженной работы науки и структурных организаций железнодорожной транспортной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.-д. транспорта. - Стереотипное издание. Перепечатка с издания 1986 г. – М.: Альянс, 2015. – 319 с.
2. Железные дороги [Электронный ресурс]/Системы электрической тяги – Режим доступа: <https://lokomu.ru/elektrosnabzhenie/sistemy-elektricheskoy-tyagi.html>
3. Брагин В.А. Схемы питания потребителей электроэнергии от тяговых подстанций систем тягового электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ, переменного тока 1х25 и 2х25 кВ и схема внешнего электроснабжения электрических железных дорог. Иркутск – 2010.
4. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник, учебное пособие. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2006.
5. Почаевец В.С. Электрические подстанции. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012.
6. Звездин М.Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог.- М.: Транспорт, 1985

7. Инфопедия [Электронный ресурс]/Система тягового электроснабжения тяги постоянного тока напряжением 3 кВ и режимы её работы – Режим доступа: <https://infopedia.su/14xd1d.html>

8. StudFiles [Электронный ресурс]/Система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/2893896/page:5/>

9. Студопедия [Электронный ресурс]/Система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 2x25 кВ – Режим доступа: https://studopedia.ru/26_73321_sistema-tyagovogo-elektrosnabzheniya-odnofaznogo-peremennogo-toka-napryazheniem-h-kv.html

10. «Бюллетень результатов научных исследований» Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 12, 24 кВ для скоростной магистрали Москва – Екатеринбург / Б.А. Аржанников, А.Г. Галкин, А.Т. Бурков, В.А. Мансуров, И.О. Набойченко. 2015. С. 38-44.

11. Б.А. Аржанников, И.О. Набойченко Концепция усиления тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ.

12. Sinref.ru [Электронный ресурс]/Перспективные виды систем электрической тяги на ж/д транспорте – Режим доступа: https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_2/177_ehlektricheskie-zheleznye-dorogi-2006-god/009.htm

13. Вунивере.ру [Электронный ресурс]/Анализ методов улучшения режима тяговой сети переменного тока – Режим доступа: <https://vunivere.ru/work33604?screenshots=1>

14. Машинформ.ру Технические характеристики промышленного оборудования [Электронный ресурс]/Трансформатор типа ОРДТНЖ – 25000/220 – У1 – Режим доступа: [https://electro.mashinform.ru/transformatory-dlya-ehlektrificirovannogo-zheleznodorozhnogo-i-gorodskogo-transporta-tyagovye---dlya-silovyh-preobrazovatelej-i-vspomogatelnyh-cepej-na-podvizhnom-sostave\)-i-tyagovyh-podstantsij/transformatov-tipa-ordtnzh-25000-220-u1-obj3327.html](https://electro.mashinform.ru/transformatory-dlya-ehlektrificirovannogo-zheleznodorozhnogo-i-gorodskogo-transporta-tyagovye---dlya-silovyh-preobrazovatelej-i-vspomogatelnyh-cepej-na-podvizhnom-sostave)-i-tyagovyh-podstantsij/transformatov-tipa-ordtnzh-25000-220-u1-obj3327.html)

15. Студопедия [Электронный ресурс]/Схемы соединения обмоток трансформаторов на тяговых подстанциях – Режим доступа: https://studopedia.su/17_27591_shemi-soedineniya-obmotok-transformatorov-na-tyagovih-podstantsiyah.html

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. Bey Yu. M., Mamoshin R. R., Pupynin V. N., Shalimov M. G. Traction substations / Textbook for universities of railway transport. - A stereotypical publication. Reprint from the 1986 edition-Moscow: Alliance, 2015 -- - 319 p.

2. Railways [Electronic resource]/Electric Traction Systems – Pre-stop mode: <https://lokomotiv.ru/elektrosnabzhenie/sistemy-elektricheskoy-tyagi.html>

3. Bragin V. A. Power supply schemes of electric power consumers from traction substations of traction power supply systems of direct current 3.3 kV, alternating current 1x25 and 2x25 kV and the scheme of external power supply of electric railways. Irkutsk-2010.

4. Opoleva G. N. Schemes and substations of power supply. Handbook, textbook. - M.: FORUM-INFRA-M, 2006.

5. Pochayevets V. S. Electric substations. - M.: UMTS ZhDT, 2012.

6. Zvezdkin M. N. Power supply of electrified railways. - M.: Transport, 1985

7. Infopedia [Electronic resource]/Traction power supply system for 3 kV DC traction and its operating modes-Access mode: <https://infopedia.su/14xd1d.html>

8. StudFiles [Electronic resource]/Traction power supply system of single-phase alternating current with voltage of 25 kV, frequency of 50 Hz-Access mode: <https://studfile.net/preview/2893896/page:5/>

9. Studopedia [Electronic resource]/Traction power supply system of single-phase alternating current with a voltage of 2x25 kV-Access mode: https://studopedia.ru/26_73321_sistema-tyagovogo-elektrosnabzheniya-odnofaznogo-peremennogo-toka-napryazheniem-h-kv.html

10. "Bulletin of the results of scientific research" The prospect of developing a DC electric traction system of increased voltage of 12, 24 kV for the Moscow – Yekaterinburg high-speed highway / B. A. Arzhannikov, A. G. Galkin, A. T. Burkov, V. A. Mansurov, I. O. Naboichenko. 2015. pp. 38-44.

11. B. A. Arzhannikov, I. O. Naboichenko The concept of strengthening the traction power supply of DC 3.0 kV.

12. Sinref.ru [Electronic resource]/Promising types of electric traction systems for railway transport – Access mode: https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_2/177_ehlektricheskie-zheleznye-dorogi-2006-god/009.htm

13. Vuniverse.ru [Electronic resource]/Analysis of methods for improving the AC traction system mode-Access mode: <https://vunivere.ru/work33604?screenshots=1>

14. Mashinform.ru Technical characteristics of industrial equipment [Electronic resource]/Transformer type ORDTNZH-25000/220-U1-Access mode: [https://electro.mashinform.ru/transformatory-dlya-ehlektroficiovannogo-zheleznodorozhnogo-i-gorodskogo-transporta-tyagovye---dlya-silovyh-preobrazovatelej-i-vspomogatelnyh-cepej-na-podvizhnom-sostave\)-i-tyagovyh-podstancij/transformatov-tipa-ordtnzh-25000-220-u1-obj3327.html](https://electro.mashinform.ru/transformatory-dlya-ehlektroficiovannogo-zheleznodorozhnogo-i-gorodskogo-transporta-tyagovye---dlya-silovyh-preobrazovatelej-i-vspomogatelnyh-cepej-na-podvizhnom-sostave)-i-tyagovyh-podstancij/transformatov-tipa-ordtnzh-25000-220-u1-obj3327.html)

15. Studopedia [Electronic resource]/Connection diagrams of transformer windings at traction substations-Access mode: https://studopedia.su/17_27591_shemi-soedineniya-obmotok-transformatorov-na-tyagovyh-podstantsiyah.html