УДК 621.311.1

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Плотников Ю. В.**

*Россия, г. Омск, ФГБОУВО ОмГУПС*

*В работе рассмотрены вопросы влияния внешних воздействий электрической и неэлектрической природы на энергоэффективность железнодорожной системы тягового электроснабжения постоянного тока. Приведена упрощенная структурная схема системы тягового электроснабжения на основе идеальных электрических элементов, представлены основные виды внешних воздействий, рассмотрено их влияние на параметры схемы.*

*Ключевые слова: система тягового электроснабжения, энергоэффективность, электроподвижной состав, потери электроэнергии.*

По итогам 2020 года доля холдинга «РЖД» в общем потреблении электроэнергии в России составила 50,26 млрд. кВт∙ч, что соответствует 4,8% от всего объема потребления электроэнергии в стране [1]. При этом большая часть, а именно 43,7 млрд. кВт∙ч, была израсходована непосредственно на тягу поездов, поэтому вопросы энергосбережения и энергоэффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ) являются одними из наиболее актуальных, особенно в свете постоянного роста тарифов на энергоресурсы.

На рисунке 1 представлен фрагмент системы тягового электроснабжения постоянного тока, имеющий упрощенную структурную схему, состоящую из идеальных электрических элементов.



***Рисунок 1 – Упрощенный фрагмент СТЭ постоянного тока из идеальных электрических элементов***

Поскольку на практике в СТЭ принимаются специальные меры, направленные на подавление высокочастотных составляющих напряжения контактной сети [2], их влияние следует считать незначительным, что позволяет исключить из схемы элементы с реактивным сопротивлением, построив ее только на основе источников постоянного напряжения и активных сопротивлений, моделирующих расход электроэнергии на тепловые потери и полезную нагрузку. Кроме того, в конструкции реальной контактной сети используются изоляторы, имеющие сравнительно низкие токи утечки, и, как следствие, низкие потери мощности на нагрев, несоизмеримые с мощностями, потребляемыми электроподвижным составом, что позволяет не учитывать влияние потерь на изоляторах в общей картине потерь электроэнергии.

Представленный фрагмент состоит из двух тяговых подстанций ТП1 и ТП2, питаемых ими трех межподстанционных зон МПЗ1 – МПЗ3, и четырех единиц электроподвижного состава ЭПС1 – ЭПС4, выполняющих перевозочную работу на этих зонах. Обе тяговые подстанции построены по одинаковой электрической схеме, и содержат по два преобразовательных агрегата, представленных источниками постоянного напряжения *E*1 – *E*4 с номинальным значением 3,3 кВ, и диодами *VD*1 – *VD*4. Диоды в этой схеме необходимы для моделирования работы выпрямительных агрегатов и исключения протекания токов через источники напряжения *E*1 – *E*4 в обратном направлении. Резисторы *R*1 – *R*4, включенные параллельно источникам, моделируют потери электроэнергии, возникающие в преобразовательных трансформаторах в режиме холостого хода. Резисторы *R*5 – *R*8 и *R*9 – *R*12 включены последовательно с источниками напряжения и моделируют соответственно тепловые потери преобразовательных трансформаторов в режиме нагрузки и тепловые потери выпрямительных агрегатов. Активные сопротивления *R*13 – *R*16 отражают тепловые потери, возникающие в шинах 3,3 кВ тяговых подстанций и в соответствующих фидерах контактной сети. Потери на активном сопротивлении контактного провода и прочие потери в контактной сети, возникающие в процессе ее работы, представлены сопротивлениями *R*17 – *R*21. Каждая из четырех единиц подвижного состава представлена источниками постоянного напряжения *E*э1 – *E*э4 и активными сопротивлениями *R*э1 – *R*э4, соединенными последовательно и подключенными одним концом к контактному проводу, другим к рельсам, что полностью отражает работу локомотива в трех основных состояниях [3]:

– в режиме тяги, когда напряжение источников *E*э1 – *E*э4 равно нулю, а сопротивления *R*э1 – *R*э4, имеют средние значения, обеспечивающие протекание тягового тока по направлению из контактной сети в электровоз;

– в режиме горячего простоя, когда напряжение источников *E*э1 – *E*э4 так же равно нулю, а сопротивления *R*э1 – *R*э4, имеют высокие значения, обеспечивающие протекание тока горячего простоя так же из контактной сети в электровоз;

– в режиме рекуперативного торможения, когда напряжение источников *E*э1 – *E*э4 находится чуть выше обычного напряжения контактной сети, а сопротивления *R*э1 – *R*э4, имеют низкие значения, обеспечивающие протекание тока рекуперативного торможения по направлению от электровоза в контактную сеть.

Если рассмотреть представленную схему с точки зрения энергоэффективности, то очевидно, что полезная работа совершается только энергией, выделяемой на сопротивлениях *R*э1 – *R*э4 в режимах тяги и горячего простоя, в то время как на всех остальных сопротивлениях выделяется только энергия потерь. Поэтому, для повышения энергетической эффективности, следует стремиться максимально увеличивать сопротивления *R*1 – *R*4, и максимально уменьшать сопротивления *R*5 – *R*21.

Оптимальным режимом работы СТЭ следует считать режим, при котором:

– сопротивления *R*1 – *R*4 максимальны;

– сопротивления *R*5 – *R*21 минимальны;

– напряжения *E*1 – *E*4 подобраны так, что все тяговые токи протекают по наиболее коротким путям.

Под внешними воздействиями на систему тягового электроснабжения следует понимать любые воздействия электрической или неэлектрической природы, поступающие извне и изменяющие режимы работы СТЭ [4]. Можно выделить много различных внешних воздействий и их комбинаций, но основными из них являются следующие.

**1. Изменение напряжения сети внешнего электроснабжения, или величины районной нагрузки.** В классическом случае под сетью внешнего электроснабжения принято понимать сеть, которая поставляет энергию на тяговую подстанцию. Как правило, это трехфазная сеть напряжением 110 либо 220 кВ, напряжение которой поступает на силовые понижающие трансформаторы, находящиеся в составе оборудования тяговой подстанции, и формирующие выходное трехфазное напряжение значением 10 или 6 кВ. Это напряжение поступает на вход преобразовательных трансформаторов, формирующих напряжение значением 3,3 кВ для тяговых выпрямительных агрегатов и на трансформаторы районной нагрузки, формирующие напряжение значением 0,4 кВ, от которого питаются различные районные потребители. Любые изменения напряжения сети внешнего электроснабжения, либо колебания мощности, потребляемой районной нагрузкой, приводят к изменениям входного напряжения преобразовательных трансформаторов, и, как следствие, к изменению выходного напряжения выпрямительно­-преобразовательных агрегатов, подающих напряжение в контактную сеть [5].

Таким образом, влияние изменения напряжения сети внешнего электроснабжения, либо влияние изменения величины районной нагрузки приводит к изменению выходного напряжения источников *E*1 – *E*4 как в большую, так и в меньшую сторону.

**2. Изменение оперативной поездной обстановки.** Оперативная поездная обстановка включает в себя множество факторов и может изменяться в различных направлениях. В частности, изменения тяговой нагрузки может быть обусловлено различными массами поездов, проходящих через межподстанционную зону за одни сутки, изменениями в графике движения поездов, который вместо равномерной загрузки может состоять из отдельных пакетов, и продолжительных окон между ними [6]. Так же на оперативную поездную обстановку влияет стиль вождения машинистов, производящих работу на зоне, которые могут по разному осуществлять разгон, использовать либо не использовать рекуперативное торможение взамен пневматического, могут по разному поддерживать необходимую скорость движения, либо изменением выбранной позиции контроллера машиниста, либо используя ослабление поля тяговых двигателей при неизменной позиции контроллера. Так же в процессе движения могут случаться различные нештатные ситуации, приводящие к отклонениям от нормативного графика движения поездов. Применительно к рассматриваемой схеме, любое изменение оперативной поездной обстановки приводит к изменениям значений сопротивлений *R*э1 – *R*э4, *R*17 – *R*21, и изменениям выходного напряжения источников *E*э1 – *E*э4 .

**3. Изменение нормальных режимов работы со стороны энергодиспетчера.** В процессе работы СТЭ по сигналам энергодиспетчера может осуществляться как изменение электрических режимов работы оборудования, так и изменение схемы соединения его отдельных элементов [7]. В частности, по этим сигналам могут быть изменены режимы работы коммутационных аппаратов линейных устройств постов секционирования, пунктов параллельного соединения и секционных разъединителей контактной сети (условно не показанных на схеме), что не нарушит питание межподстанционной зоны, но может значительно изменить ее работу в энергетическом плане. Применительно к схеме это вызовет изменение сопротивления резисторов *R*17 – *R*21. Кроме того, энергодиспетчер может подключать или отключать отдельные преобразовательные агрегаты ТП, коммутируя выключатели *K*1 – *K*4, изменяя всю структуру схемы и вызывая тем самым как изменение выходного напряжения тяговых подстанций, так и изменение их выходного сопротивления.

**4. Возникновение вынужденных и аварийных режимов работы под влиянием внешних факторов.** При возникновении различных нештатных ситуаций, например таких, как короткие замыкания, обрывы контактного провода на межподстанционной зоне и пр., под действием систем защиты и автоматики нормальные режимы работы оборудования изменяются на вынужденные или аварийные [8]. При этом возможно изменение состояния и характеристик всех элементов схемы, включая источники *E*э1 – *E*э4  и сопротивления *R*э1 – *R*э4 электроподвижного состава.

**5. Краткосрочное и долгосрочное влияние погодных условий.** Атмосферные осадки, температура окружающей среды и прочие природные факторы так же оказывают влияние на состояние элементов системы тягового электроснабжения [9]. Резкие изменения погодных условий, такие как снег, дождь, понижение температуры способны вызвать обледенение контактного провода. Повышенная влажность совместно с колебаниями температуры окружающего воздуха, периодически пересекающими нулевую отметку, в долгосрочной перспективе способны вызвать возникновение коррозионных явлений, приводящих к постепенному увеличению сопротивлений шин тяговых подстанций и элементов контактной сети. На рассматриваемой схеме это приводит к увеличению значений «последовательных» сопротивлений *R*5 – *R*16 и *R*17 – *R*21.

Таким образом, все рассмотренные основные внешние воздействия, не зависимо от природы их возникновения, приводят к изменениям характеристик элементов рассматриваемой схемы за исключением, разве что, сопротивлений резисторов *R*1 – *R*4, моделирующих потери электроэнергии холостого хода преобразовательных трансформаторов. Значения этих потерь в основном определяются конструкцией трансформаторов и практически не зависят от влияния внешних факторов. В остальном, внешние воздействия практически всегда способны нарушить оптимальный режим работы системы тягового электроснабжения постоянного тока, что требует принятия специальных мер по устранению их негативного влияния.

Список литературы

1. Белозеров, О. В. Доклад генерального директора - председателя правления открытого акционерного общества "Российские железные дороги" О.В. БЕЛОЗЁРОВА на итоговом заседании правления ОАО "РЖД" / О. В. Белозеров // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 7-16.

2. Яковлева, Т. Д. Нормализация напряжений высших гармоник на нагрузке, подключенной к сети, питающей тяговые нагрузки / Т. Д. Яковлева, С. Г. Тигунцев // Энергетика в современном мире : VIII Международная заочная научно-практическая конференция, Чита, 11–15 декабря 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет». – Чита: Забайкальский государственный университет, 2017. – С. 143-147.

3. Кейно, М. Ю. Современный подход к исследованию режимов работы локомотивов / М. Ю. Кейно // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 1. – С. 36-38.

4. Бочарников, Ю. В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами / Ю. В. Бочарников // Технологии электромагнитной совместимости. – 2008. – № 1(24). – С. 45-55.

5. Никифоров, М. М. Влияние условий сопряжения систем внешнего и тягового электроснабжения на уровень потерь электроэнергии в тяговой сети / М. М. Никифоров, Ю. В. Кондратьев, А. Л. Каштанов // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Красноярск, 19–21 мая 2005 года. – Красноярск: Гротеск, 2005. – С. 101-104.

6. Мороз, А. И. К теории движения железнодорожного транспорта с внеграфиковыми поездами / А. И. Мороз // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2013. – № 3. – С. 12-15.

7. Чекулаев, В. Е. Энергодиспетчер - главный управляющий электроустановками дистанции электроснабжения / В. Е. Чекулаев, Е. Н. Горожанкина // Локомотив. – 2014. – № 8(692). – С. 39-41.

8. Тимофеев, А. Н. Моделирование аварийных режимов с целью решения основных проблем при проектировании тяговой подстанции / А. Н. Тимофеев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов, Москва, 15–16 марта 2018 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2018. – С. 484.

9. Перспективы электрической тяги // Железные дороги мира. – 2018. – № 5. – С. 59-64.

**Плотников Юрий Викторович**, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35. E-mail: [ra9mjr@mail.ru](mailto:ra9mjr@mail.ru), тел.: +7(913) 988-45-20

**INFLUENCE OF EXTERNAL IMPACTS ON THE EFFICIENCY OF THE DIRECT CURRENT TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM**

**Plotnikov Y.V.**

*Russia, Omsk, FGBOUVO OmGUPS*

*The paper considers the issues of the influence of external influences of electrical and non-electrical nature on the energy efficiency of the railway system of direct current traction power supply. A simplified block diagram of a traction power supply system based on ideal electrical elements is presented, the main types of external influences are presented, and their influence on the parameters of the circuit is considered.*

*Key words: traction power supply system, energy efficiency, electric rolling stock, power losses.*

Bibliography

1. Belozerov O.V. Report of the General Director - Chairman of the Board of the Open Joint Stock Company "Russian Railways" O.V. BELOZEROV at the final meeting of the board of JSC "Russian Railways" / O.V. Belozerov // Railway transport. - 2021. - No. 3. - P. 7-16.

2. Yakovleva T. D. Normalization of voltages of higher harmonics on a load connected to the network supplying traction loads / T. D. Yakovleva, S. G. Tiguntsev // Energy in the modern world: VIII International Correspondence Scientific and Practical Conference, Chita , December 11-15, 2017 / Ministry of Education and Science of the Russian Federation Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Trans-Baikal State University". - Chita: Trans-Baikal State University, 2017 .-- P. 143-147.

3. Keino M. Yu. Modern approach to the study of locomotive operating modes / M. Y. Keino // Automation in industry. - 2007. - No. 1. - S. 36-38.

4. Bocharnikov Y. V. Modeling of the traction power supply system for the assessment of electromagnetic compatibility with adjacent systems / Y. V. Bocharnikov // Technologies of electromagnetic compatibility. - 2008. - No. 1 (24). - S. 45-55.

5. Nikiforov M. M. Influence of the conditions of conjugation of external and traction power supply systems on the level of power losses in the traction network / MM Nikiforov, Y. V. Kondratyev, A.L. Kashtanov // Resource-saving technologies in railway transport: Materials All-Russian scientific and technical conference with international participation, Krasnoyarsk, May 19-21, 2005. - Krasnoyarsk: Grotesk, 2005 .- S. 101-104.

6. Moroz AI Towards the theory of railway transport with off-schedule trains / AI Moroz // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. - 2013. - No. 3. - S. 12-15.

7. Chekulaev V. E. Energy dispatcher - chief manager of electrical installations of the power supply distance / V. E. Chekulaev, E. N. Gorozhankina // Locomotive. - 2014. - No. 8 (692). - S. 39-41.

8. Timofeev A. N. Modeling of emergency modes in order to solve the main problems in the design of a traction substation / A. N. Timofeev // Radio electronics, electrical engineering and energy: Abstracts, Moscow, March 15-16, 2018. - Moscow: Limited Liability Company "Center for Printing Services" RADUGA ", 2018. - P. 484.

9. Prospects for electric traction // World Railways. - 2018. - No. 5. - S. 59-64.

**Yuri V. Plotnikov**, postgraduate student of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State University of Railways, Russia, 644046, Omsk, Marksa Ave., 35. E-mail: ra9mjr@mail.ru, tel .: +7 (913) 988-45-20