

# Электромагнитная совместимость в сетях электроснабжения



Борис КОСАРЕВ  
Boris I. KOSAREV

Дмитрий СЕРБИНЕНКО  
Dmitry V. SERBINENKO



*Косарев Борис Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Заслуженный деятель науки РФ. Сербиненко Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Энергопромышленные технологии».*

**Предложены технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными железными дорогами переменного тока. При этом учитываются особенности функционирования тяговых систем в зависимости от их категорийности.**

*Ключевые слова:* железная дорога, электрификация, электромагнитная совместимость, ток, напряжение, тяговая сеть, электроустановка, электровоз, заземление.

**З**адачи обеспечения электромагнитной совместимости электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными участками переменного тока магистральных железных дорог со скоростным движением весьма актуальны, что подтверждается наличием статистических данных об отказах в работе систем управления транспортом.

Выполнение требований совместимости предполагает проведение комплексного технико-экономического анализа для каждого случая в отдельности. В ходе такого анализа должны учитываться интерфейсы между различными подсистемами электрических железных дорог, включающие принятие технических решений, от которых зависит бесперебойное электроснабжение ЭПС.

Первостепенное значение имеют требования к системе тягового электроснабжения, которая призвана:

- а) обеспечивать эксплуатационные характеристики для:
  - специально построенных высокоскоростных линий под скорости движения поездов свыше 200 км/ч (первая категория);
  - скоростных линий, модернизирован-

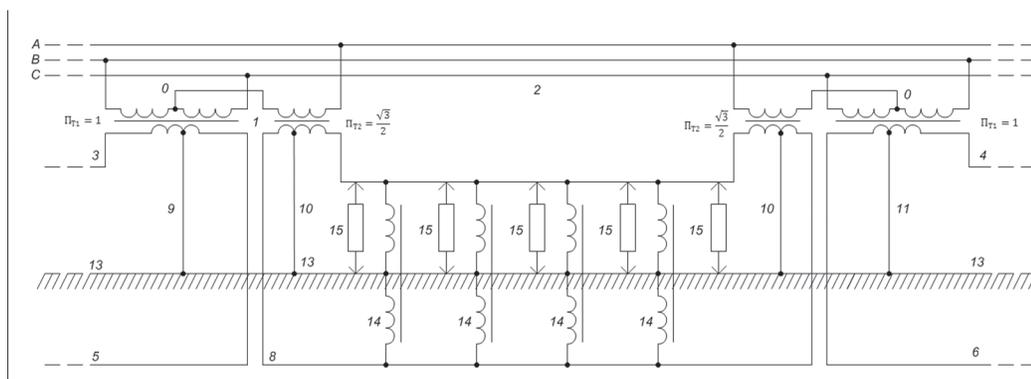


Рис. 1. Принципиальная схема системы тягового электроснабжения распределенного питания с проводом повышенного напряжения (СТЭ ППН).

ных под скорости от 160 до 200 км/ч (вторая категория);

– скоростных линий под скорости менее 160 км/ч (третья категория);

б) быть совместимой в точках соприкосновения токоприемника с контактным проводом и зонах стекания тягового тока ЭПС в обратную тяговую сеть;

в) обеспечивать нормативные показатели качества электрической энергии, в том числе в точке общего присоединения.

Выполненный анализ систем тягового электроснабжения переменного тока с позиции их электромагнитной совместимости с устройствами нетягового электроснабжения позволяет предложить свои технические решения.

1. Для ограничения до нормируемых величин магнитного (опасного и мешающего) влияния токов электроподвижного состава на электроустановки и сети напряжением до и выше 1000 В необходимо иметь в виду:

а) тяговое электроснабжение высокоскоростных линий первой категории осуществляется по системе с использованием распределенного питания и провода повышенного напряжения (ППН) (рис. 1) [1] и с учетом двух обстоятельств:

– при подключении разделительно-симметрирующих трехфазно-двухфазных трансформаторов 1 к трем фазам А, В, С линии электропередачи 2 с линейным напряжением  $U_{лэп}$ , равным 110 или 220 кВ, на зажимах первичной обмотки первой части будет напряжение  $U_{лэп}$  и на зажимах первичной

обмотки второй части –  $\frac{\sqrt{3}}{2} U_{лэп}$ . Транс-

форматоры 1 разделяют линию электропередачи 2 от тяговой сети и исключают в линии 2 протекание токов нулевой последовательности. Трансформация напряжения с коэффициентами трансформации первой части, равным единице  $n_{T1} = 1$ , а второй части, равным  $n_{T2} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ , обеспечивает на зажи-

мах вторичных обмоток обеих частей напряжения, равные линейному напряжению линии электропередачи 110 или 220 кВ. Подключение вторичных обмоток первой части между контактными подвесками 3 и 4 и питающими проводами 5 и 6 второй части – между контактной подвеской 7 и питающим проводом 8 дает питание однофазным тяговым трансформаторам 14 напряжением 110 или 220 кВ. Поскольку трехфазно-двухфазные трансформаторы 1 соединены по схеме Скотта, то напряжения первой и второй частей первичных обмоток по фазе будут взаимно перпендикулярны, а также взаимно перпендикулярны напряжению вторичных обмоток. Следовательно, значительно уменьшается несимметрия токов в линии электропередачи 2, а при одинаковой нагрузке плеч подстанции обеспечивается полная симметричная загрузка линии электропередачи;

– при подключении автотрансформаторов 14 первичными обмотками между контактной подвеской 7 и продольным питающим проводом 8 на напряжение 110 и 220 кВ, вторичными обмотками – между контактной подвеской 7 и рельсами 13 в точках питания контактной подвески 7 обеспечивается максимально допустимое напряжение. Электровазы 15, расположенные на перегоне, получают питание от двух соседних автотранс-





форматоров 14, а электровозы 15, расположенные между подстанцией и первым от нее автотрансформатором 14 – питание от этого автотрансформатора и части вторичной обмотки трехфазно-двухфазного трансформатора 1, специальный вывод которого подключен к рельсам 13 с помощью отсасывающей линии 10. Поскольку между контактной подвеской 7 и питающим проводом 8 наличествует напряжение 110 или 220 кВ и им питаются автотрансформаторы 14, то уменьшаются токовая нагрузка проводов подвески 7 и провода 8, потери напряжения и электроэнергии в тяговой сети. При этом формируется напряжение 25 кВ между контактной подвеской и рельсами и напряжение 85 или 195 кВ между продольным питающим проводом и рельсами;

б) тяговое электроснабжение скоростных линий второй категории осуществляется:

– с использованием распределительного питания и провода повышенного напряжения (рис. 1). Тяговые трансформаторы в отличие от схемы рис. 1 подключаются первичной обмоткой между контактной сетью и продольным высоковольтным проводом, а вторичной – между контактной сетью и рельсовым путем [1];

– по системе 2×25 кВ с автотрансформаторами и питающим проводом, в которой тяговые трансформаторы подстанций соединены по схеме Скотта (Вудбриджа);

– по системе с экранированным усиливающим проводом при соединении тяговых подстанций согласно схеме Скотта (Вудбриджа);

– с использованием многофункциональных тяговых трансформаторов [2];

в) тяговое электроснабжение скоростных линий третьей категории реализуется:

– по схеме с экранированным усиливающим проводом и установкой на тяговых подстанциях тяговых трансформаторов с симметрирующим эффектом, собираемых по схеме Скотта (Вудбриджа);

– с использованием тяговых трансформаторов с симметрирующим эффектом [2], а также тяговых трансформаторов в сочетании с многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами [3].

В качестве многофункционального вольтодобавочного трансформатора (МФ ВДТ) применяется силовой трансформатор типа ОРМЖ-10000/27, спроектированный и из-

готовленный на СВПО «Трансформатор». МФ ВДТ имеет расщепленную обмотку низкого напряжения (НН).

Эта обмотка состоит из двух секций – полуобмоток с номинальным напряжением 2,5 кВ и номинальными токами 2000 А. Конструкция и изоляция обмоток всех вводов позволяют использовать трансформатор не только как понижающий для установок регулируемой поперечной емкостной компенсации, не только как вольтодобавочный, но и как комбинированное средство усиления системы тягового электроснабжения – трансформатор с компенсационной обмоткой (ВДТ-К). Возможен ряд схем подключения МФ ВДТ. Одна из секций обмотки НН с номинальным рабочим напряжением 2,5 кВ включается в расщепку плеча питания тяговой подстанции с наиболее низким напряжением и выполняет роль ВДО-вольтодобавочной обмотки. Вторая секция обмотки НН с таким же номинальным напряжением 2,5 кВ нагружается конденсаторной батареей [3].

Мощность компенсирующей установки выбирается с учетом несинусоидального характера тока электроподвижного состава. Критерием выбора и регулирования является коэффициент, рассчитываемый по формуле [4]:

$$K_n = \frac{W_+}{W_+ + W_-},$$

где  $W_+$  – активная энергия, потребляемая системой тягового электроснабжения;  $W_-$  – обменная энергия, циркулирующая на участке системы внешнего электроснабжения – МФ ВДТ.

2. Уменьшение числа коротких замыканий, а также снижение электромагнитного влияния системы тягового электроснабжения на электрические сети напряжением до и выше 1000 В должно достигаться:

– внедрением полимерной изоляции устройств контактной сети, постов секционирования (пунктов параллельного секционирования), линии продольного электроснабжения нетяговых потребителей и т.д.;

– сокращением времени отключения аварийных режимов за счет применения вакуумных устройств и т.д.;

– проведением профилактики контактной сети, путевых работ и прочего лишь при

снятии рабочего напряжения с контактной сети (для электрифицированных линий 1 и 2);

– использованием безынерционных токоограничивающих устройств [5];

– внедрением блочно-модульной технологии при сооружении и реконструкции тяговых подстанций, линейных устройств тягового и нетягового электроснабжения.

3. Для получения нормируемых значений показателей качества электрической энергии в точке общего присоединения должны быть внедрены:

а) на тяговых подстанциях

– тяговые трансформаторы с симметрирующим эффектом, соединенные по схеме Скотта (Вудбриджа), трансформаторы с расщепленными обмотками;

– многофункциональные вольтодобавочные трансформаторы;

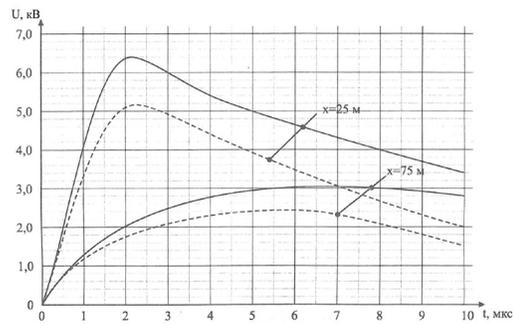
б) продольная емкостная компенсация (УПРК) и поперечная емкостная компенсация (УППК) соответственно на постах секционирования и тяговых подстанциях, причем установки такого назначения предполагают достаточную надежность, возможность выполнять повышенное число коммутаций.

4. Обратная тяговая сеть, включающая в себя рельсовый путь с межпутными и рельсовыми соединителями, путевые дроссель-трансформаторы, рельсо-шпальную путевую решетку и дополнительные провода, подключенные параллельно рельсовому пути, должна обеспечивать надежное функционирование систем тягового электроснабжения, их совместимость с современными устройствами управления движением поездов.

5. Электрическое влияние напряжения контактной сети, магнитное влияние токов электроподвижного состава, гальваническое влияние стекающего с рельсового пути тока на низковольтные сети и электроустановки должны согласовываться между системами «электроснабжение» и «управление и сигнализация».

6. Обеспечение допустимых уровней электромагнитного влияния тягового электроснабжения на устройства управления и сигнализации, должно достигаться следующими мерами:

а) Отказом от использования рельсового пути в качестве естественного заземлителя опор контактной сети.



— при использовании в качестве заземлителя троса группового заземления;  
 - - - при использовании рельсового пути в качестве заземлителя.

**Рис. 2.** Мгновенные значения напряжений рельсы-земля и трос группового заземления-земля в зависимости от расстояния до места разряда тока молнии в контактную сеть.

Установлено [6], что существующие типы дистанционных защит позволяют определить возникновение режима короткого замыкания, обусловленного нарушением изоляции в опоре, если арматура опор контактной сети соединяется с тросом группового заземления, длина которого не превышает 400 м.

В случае невозможности соединения арматуры опор контактной сети с тросом группового заземления его следует подключать к двум искусственным заземлителям, сопротивление растеканию каждого из которых не превышает 15 Ом.

б) Отказом от грозозащиты контактной сети, питающих и усиливающих проводов.

Действительно, при разряде токов молнии в контактную сеть происходит пробой изоляции на ряде опор, поскольку грозозащитные устройства, в том числе и ОПН, выполняют важную, но лишь частичную задачу: ограничение грозовых перенапряжений на изоляции анкерной опоры.

Кроме того, за счет электромагнитного влияния токов молнии при их разрядах в непосредственной близости от тяговых сетей уровни перенапряжения в контактной сети превышают пробивное напряжение изоляции опор. Для ограничения перенапряжений в контактной сети, имеющих место при разрядах токов молнии в землю, применение грозозащитных устройств невозможно по технико-экономическим соображениям.

Картина распределения мгновенных значений напряжений рельсы-земля и трос





группового заземления-земля при пробое изоляции контактной сети в грозовой период приведена на рис. 2.

Показано, что при использовании в качестве заземлителя опор контактной сети ТГЗ, не соединенного с рельсовым путем, уровни перенапряжений в тяговых сетях незначительно превышают аналогичные величины в случае, если рельсовые пути используются в качестве естественного заземлителя.

в) *Заземлением грозозащитных устройств (ограничителей перенапряжения) трансформаторных подстанций, КТП на искусственный заземлитель с сопротивлением растеканию, соответствующим правилам устройства электроустановок [5].*

Учтем, что напряжение на входе протяженного заземлителя, обусловленное стеканием тока молнии, можно представить в виде наложения сдвинутых друг относительно друга импульсов, изменяющихся по линейному закону.

Тогда расчет перенапряжений по длине протяженного заземлителя при изменении напряжения на его входе по нелинейному от времени закону ( $u = k_1 t$ ) осуществляется по формуле при  $0 \leq t \leq \tau_0$ :

$$u_1(x; t) = k_1 \frac{ch\sqrt{r_1 g_1} (l - x)}{ch\sqrt{r_1 g_1} l} t -$$

$$- k_1 \frac{\pi}{\tau^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k+1) \cdot \sin \left[ (2k+1) \frac{\pi x}{2l} \right]}{\omega_k (\delta^2 + \omega_k^2)} \cdot$$

$$\cdot \frac{1}{\delta^2 + \omega_k^2} [2\omega_k \delta] -$$

$$- e^{-\delta t} \left( 2\delta \omega \cdot \cos \omega_k t + (\delta^2 - \omega_k^2) \cdot \sin \omega_k t \right)$$

при  $\frac{r_1}{l_1} = \delta + \sigma$ ;  $\frac{g_1}{c_1} = \delta - \sigma$ ;

$$v = \frac{\sqrt{\delta^2 - \sigma^2}}{\sqrt{r_1 g_1}}; \tau = \frac{l}{v}$$

$$\omega_k = \sqrt{\left[ (2k+1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 - \sigma^2},$$

где  $r_1; l_1; g_1; c_1$  – первичные параметры протяженного заземлителя;  $\tau_\phi$  – длительность фронта волны грозового напряжения на входе протяженного заземлителя;  $t$  – время.

При  $t \geq \tau_\phi$  картина распределения напряжения в протяженном заземлителе рассчитывается по формуле:

$$u(x; t) = u_1(x; t) - k_2 (x; t - \tau_\phi),$$

где  $k_2$  – коэффициент, характеризующий изменение напряжения при  $t \geq \tau_\phi$ .

г) *Отказом от использования для электропитания нетяговых потребителей системы два провода-рельсы (ДПР) и осуществлением электроснабжения по системе два провода-искусственный заземлитель (ДПИЗ) [5].*

Использование системы ДПИЗ вместо системы ДПР целесообразно в том случае, когда невозможно расположить на опорах контактной сети дополнительный (третий) питающий провод. Это определяется требованием обеспечить как механическую прочность опор контактной сети, так и возможность обслуживания системы электроснабжения нетяговых потребителей исходя из условий соблюдения безопасности работ без снятия напряжения с контактной сети.

д) *Внедрением на линиях (второй и третьей категорий) экранирующих проводов для частичного выравнивания тяговых токов по рельсовым нитям [5].*

е) *Использованием для питания нетяговых потребителей воздушных линий напряжением 10 (20 и 35) кВ с шагом транспозиции 7,5 км при расположении ЛЭП на отдельно стоящих опорах и шагом транспозиции 3 км при расположении ЛЭП на опорах контактной сети переменного тока.*

При расположении ЛЭП 10 кВ на опорах контактной сети защита линии от электромагнитного влияния обеспечивается включением резистивно-емкостных фильтров.

При применении ЛЭП 10 кВ самонесущих изолированных проводов дистанционная их защита от обрывов выполняется по усовершенствованной схеме, в основу которой положен принцип фиксации напряжения нулевой последовательности, в том числе на резистивно-емкостном фильтре при его расположении в конце линии.

ж) Осуществлением электроснабжения постов ЭЦ от трехфазных линий напряжением 10–35 кВ и использованием для исключения пожаров и электротравматизма системы *TN-C-S* с обязательным присутствием в схеме автоматических выключателей [8].

7. Вопросы электромагнитной совместимости электроподвижного состава с низковольтными сетями и электроустановками (рельсовые цепи, цепи управления работой устройств связи и т. п.) должны быть согласованы между системами «подвижной состав» и «управление и сигнализация».

8. Электробезопасность обслуживания электроустановок и сетей систем тягового электроснабжения должна обеспечиваться реализацией соответствующих технических решений на стадии проектирования заземляющих устройств, учитывающих геоэлектрический характер грунтов, климатические зоны и первичные критерии электробезопасности.

Согласование систем «электроснабжение» и «инфраструктура» в части защиты персонала от поражения электрическим током (заземление) осуществляется с опорой на правила устройства электроустановок, ГОСТ 12.1.038-82 (переиздан в 2001 г.), ведомственных правил и инструкций.

9. Электромагнитная совместимость системы «электроснабжение» с другими системами ОАО «РЖД» не может быть обеспечена без коренного улучшения структуры управления энергетическим комплексом на основе современных информационных технологий, систем учета, мониторинга топлива и энергопотребления, а также без собственного сектора генерации электроэнергии со стабильным и гармонически изменяющимся уровнем напряжения.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости электроустановок и сетей тягового электроснабжения с электрифицированными железными дорогами переменного тока.

2. Показана необходимость дифференцированного подхода к внедрению современных систем тягового электроснабжения для обеспечения бесперебойной работы железнодорожного транспорта на скоростных участках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асанов Т. К., Косарев Б. И., Караев Р. И., Петухова С. Ю. Система тягового электроснабжения участков переменного тока. Авторское свидетельство SU № 1689143 А1-М.: Патент. 07.11.1991. Бюл. № 4.

2. Мамошин Р. Р., Бородулин В. М., Зельвянский А. Я., Титов А. Ф. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом. // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 1.

3. Болдырев В. Н., Власов С. П., Ключников С. В., Косарев Б. И. и др. Устройство электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока. Авторское свидетельство SU № 1654056 А1-М.: Патент. 07.06.1991. Бюл. № 21.

4. Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Критерий регулирования компенсирующих установок систем тягового электроснабжения переменного тока при несинусоидальных токах источников и потребителей электрической энергии // XII Всемирный электрический конгресс. – М., 2011.

5. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2008.

6. Косарев А. Б., Логинов С. В. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2009 – № 2.

7. Косарев Б. И., Сербиненко Д. В., Кузнецов Д. Г. Совершенствование дистанционных защит воздушных линий напряжением свыше 1000 В с самонесущими изолированными проводами в зонах электромагнитного влияния тяговых сетей переменного тока // Электротехника. – 2011. – № 8.

8. Косарев А. Б., Сербиненко Д. В. Система обеспечения электромагнитной совместимости устройств автоблокировки и связи с тяговым электроснабжением переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 3. ●

## ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN POWER NETWORKS

**Kosarev, Boris I.** – D.Sc. (Tech), professor, head of the department of the theory of electrical engineering of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT). Meritorious scientist of Russian Federation.

**Serbinenko, Dmitry V.** – Ph. D. (Tech), director general of Energy industrial technologies LLC.

The authors propose engineering solutions ensuring electromagnetic compatibility of not traction power installations and electric supply networks with AC electrified railways. They take into account different characteristics of traction systems of power supply, conditioned by their respective categories.

**Key words:** railway, electrification, electromagnetic compatibility, current, voltage, traction power network, electric installation, electric locomotive, grounding.

Координаты авторов (contact information): Косарев Б. И. – (495) 684 24 62, Сербиненко Д. В. – Dserbinen@gmail.com.

