

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### *Реферат*

*В статье представлен анализ особенностей обеспечения электромагнитной совместимости на тяговых подстанциях переменного тока. Рассмотрены вопросы нормативного обеспечения мероприятий по электромагнитной совместимости. Предложены мероприятия по оптимизации электроснабжения собственных нужд тяговой подстанции переменного тока. Выполнена расчётная оценка влияния токов и напряжения в распределительных устройствах 27,5 кВ на микропроцессорные технические средства тяговой подстанции.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время отмечается нечёткость понимания термина "электромагнитная совместимость" предприятиями различных форм собственности, работающих в области электроэнергетики. В частности, для тяговых подстанций железных дорог переменного тока под данным термином понимают различные общесистемные проблемы линейного характера, но не рассматривают взаимодействие высоковольтного оборудования, заземляющих устройств и микропроцессорного оборудования релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи, учёта электроэнергии, установленного непосредственно на подстанции. Целью статьи является определение особенностей электромагнитной обстановки на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока и обеспечения электромагнитной совместимости микропроцессорного оборудования, установленного на тяговых подстанциях.

### **1. ПРОБЛЕМА НЕЧЁТКОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

В соответствии с ГОСТ 30372-95 [1], электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС) – способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средством. При этом данным стандартом, и прочей основной нормативной документацией не уточняется, какие именно технические средства и в какой электромагнитной обстановке должны функционировать с заданным качеством. Данная нечёткость определения приводит к тому, что под термином "электромагнитная совместимость" на объектах электроэнергетики понимают совершенно разные по сути процессы и явления, нередко объясняя неработоспособность оборудования по причинам ЭМС, например:

- из-за неправильного выбора уставок релейной защиты;
- из-за неправильного выбора сечения проводов, кабелей;
- из-за несимметричной нагрузки систем электроснабжения при подключении мощных однофазных нагрузок к трёхфазной системе электроснабжения;
- из-за нелинейной нагрузки систем электроснабжения, в частности, из-за неправильного выбора мощности электродвигателей, трансформаторов.

Из каждого приведённого примера очевидно следует, что неработоспособность оборудования связана с ошибками при выборе основного оборудования, а не из-за влияния высоковольтного силовоточного оборудования на чувствительные к помехам микропроцессорные устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи, учёта электроэнергии и пр., что подразумевают нормативные документы по обеспечению электромагнитной совместимости ОАО "ФСК ЕЭС" [5, 6] и ОАО "Газпром" [7], а также общий для всех объектов электроэнергетики нормативный документ РД 34.20.116-93 "Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех" [8].

Конечно, если провод разрушится (перегорит) из-за превышения термической стойкости – электромагнитная совместимость обеспечена не будет вследствие разрушения источника помех, но является ли этот вопрос предметом работы специалиста по ЭМС? В соответствии со стандартами по ЭМС ОАО "ФСК ЕЭС", ОАО "Газпром" и РД 34.20.116-93 – не является, однако из-за нечёткости определения электромагнитной совместимости специалисту по ЭМС нередко приходится разбираться во всех аспектах конструирования, проектирования и эксплуатации электрооборудования, быть своеобразным универсальным специалистом.

В системах электроснабжения железных дорог вопрос электромагнитной совместимости традиционно рассматривается в разрезе обеспечения электромагнитной совместимости контактной сети и параллельно следующих линий связи [10, 13]. В конце 90-х годов XX века отмечается расширение применения термина "электромагнитная совместимость" на железных дорогах [12, 14]. К вопросам ЭМС на железных дорогах стали относить проблемы:

- электрохимзащиты подземных сооружений от действия блуждающих токов;
- влияния гармоник тягового тока на работу железнодорожной автоматики и телемеханики, подключённой к рельсовым цепям;
- повышения коэффициента мощности.

В настоящее время к вопросам обеспечения электромагнитной совместимости на железнодорожном транспорте также относят вопросы:

- несимметричной нагрузки трансформаторного оборудования тяговых подстанций переменного тока [15];
- неправильной работы релейной защиты распределительных устройств 27,5 кВ тяговых подстанций переменного тока при

однофазных коротких замыканиях на стороне 110, 220 кВ [16].

Следует отметить, что все перечисленные аспекты электромагнитной совместимости являются вопросами линейных объектов (контактной сети, линий электропередачи внешнего электроснабжения) или энергосистемы в целом, но не тяговой подстанции. Вместе с тем вопросы ЭМС как обеспечения допустимых уровней влияния высоковольтного оборудования и системы молниезащиты на низковольтное микропроцессорное оборудование вторичных систем тяговой подстанции в настоящее время возникают, и в перспективе будут возникать всё чаще, что связано с оснащением тяговых подстанций современным микропроцессорным оборудованием, чувствительным к помехам, вместо старого оборудования вторичных систем на базе электромеханических реле.

Вместе с тем, следует признать полную неготовность ОАО "РЖД" (как крупнейшего собственника тяговых подстанций переменного тока) к решению вопросов ЭМС на тяговых подстанциях вследствие отсутствия каких-либо нормативных документов, аналогичных стандартам ОАО "ФСК ЕЭС" и ОАО "Газпром". В статье приводится анализ особенностей электромагнитной обстановки и оценка возможности применения стандартов ОАО "ФСК ЕЭС" и ОАО "Газпром" по электромагнитной совместимости на тяговых подстанциях переменного тока, основанный на результатах опытной оценки электромагнитной обстановки подстанций Мысовской дистанции электроснабжения Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО "РЖД", выполненной ООО "Альфа ЭМС" в 2013-2014 годах.

## 2. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основные источники электромагнитных воздействий на микропроцессорное оборудование тяговой подстанции переменного тока принципиально не отличаются от источников воздействий на подстанциях ОАО "ФСК ЕЭС" [5]. К ним относятся:

- короткие замыкания на шинах подстанции и линиях электропередачи, являющиеся источником кондуктивных помех и токов в экранах контрольных кабелей;
- импульсные наведённые и кондуктивные помехи при коммутациях и коротких замыканиях в первичных цепях;
- импульсные помехи от токов молнии, наведённые с элементов молниезащиты;
- обратное перекрытие с элементов молниезащиты;
- электромагнитные поля промышленной частоты от ошинок распределительных устройств и однофазных реакторов без ферромагнитных сердечников, в максимальном рабочем режиме и в режиме короткого замыкания;
- электромагнитные поля радиочастотного диапазона, от внешних и внутренних источников радиопередачи различного назначения;
- импульсные магнитные поля от токов молнии, протекающих по элементам молниезащиты;
- разряды статического электричества;
- коммутации в цепях электропитания, несимметрия и несинусоидальность напряжения электропитания.

Вместе с тем, по результатам рассмотрения упрощённой схемы тяговой подстанции [11], рис. 1, а также опытным

данным обследования электромагнитной обстановки тяговых подстанций Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО "РЖД", следует отметить виды помех, имеющих особое значение на тяговых подстанциях переменного тока:

1. Несимметрия напряжения электропитания вторичного оборудования, вследствие несимметричной загрузки плеч питания контактной сети;
2. Электромагнитные поля промышленной частоты, вследствие несимметрии расположения фаз ошиновки распределительного устройства (РУ) 27,5 кВ в пространстве;
3. Несинусоидальность напряжения электропитания вторичного оборудования, вследствие работы выпрямительных преобразователей на электроподвижном составе (ЭПС) и искрения при контакте токоприёмников ЭПС и проводов контактной сети.

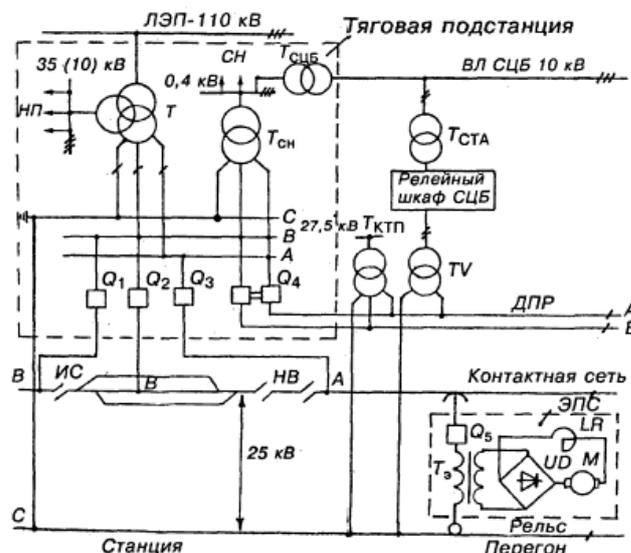


Рис. 1. Упрощённая схема тяговой подстанции переменного тока

## 3. ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ НАПЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Источниками несимметрии напряжения электропитания микропроцессорных технических средств на тяговой подстанции переменного тока (рис. 1) являются:

1. Однофазная тяговая нагрузка, подключенная со стороны 27,5 кВ;
2. Несимметричная линия продольного электроснабжения "два провода – рельс" (ДПР) 27,5 кВ.

Несимметрия токов со стороны 27,5 кВ передаётся на собственные нужды подстанции (электропитание микропроцессорных технических средств) обратной трансформацией через трансформаторы собственных нужд (ТСН).

При этом к тяговой подстанции переменного тока подключаются также симметричные нагрузки:

1. Нетяговая нагрузка со стороны 10 (35) кВ;
2. Нагрузка собственных нужд, включая линию электроснабжения 10 кВ устройств сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ).

В связи с отсутствием стандартов ОАО "РЖД" по оценке передачи несимметрии обратной трансформацией на напряжение электропитания, представляется возможным использовать оценку электромагнитной обстановки и совместимости на подстанции в соответствии со стандартами ОАО "ФСК ЕЭС" [5,

6], предписывающими в части несимметрии токов и напряжений оценивать коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности и сравнивать их с допустимым по ГОСТ 32144-2013 [2] значением 2%.

Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности напряжения электропитания на тяговой подстанции переменного тока будет незначителен в связи с подключением ТСН со стороны 27,5 кВ головного трансформатора, соединённой в звезду без нулевого провода или треугольник. Соответственно, для оценки электромагнитной обстановки и совместимости при подключении собственных нужд со стороны 27,5 кВ представляется возможным оценивать коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $K_2$  по результатам тяговых расчётов загрузки плеч питания А, В и рельсового фидера С:

$$K_2 = \frac{I_{A2}}{I_{A1}}$$

где  $I_{A1}$ ,  $I_{A2}$  – токи прямой и обратной последовательностей, определяемые выражениями

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + a \cdot I_B + a^2 \cdot I_C)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + a^2 \cdot I_B + a \cdot I_C)$$

где  $a$  – оператор поворота,  $a = e^{j120^\circ}$ ,

$I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – токи прямой и обратной последовательностей фидеров контактной сети А, В и рельсового фидера С.

Для адекватной оценки электромагнитной обстановки и совместимости представляется необходимым выполнить расчёт коэффициента несимметрии по обратной последовательности для нескольких режимов загрузки фидеров, по тяговому расчётам. В случае отсутствия данной информации следует рассмотреть максимальные рабочие режимы одностороннего электроснабжения фидерных зон А и В, а также максимальный рабочий режим двустороннего электроснабжения фидерных зон А и В.

Следует отметить, что типовая схема тяговой подстанции переменного тока (рис. 1) является неоптимальной с точки зрения ЭМС, поскольку собственные нужды (ТСН) подключены непосредственно к несимметричной стороне 27,5 кВ. Если подключить ТСН со стороны 10 (35) кВ, несимметрия напряжения электропитания уменьшится пропорционально доле несимметричной нагрузки в общей нагрузке подстанции,

$$K_2 = K_{\text{осл}} \cdot \frac{I_{A2}}{I_{A1}}$$

где  $K_{\text{осл}}$  – коэффициент ослабления передачи несимметрии электропитания, укрупнённо определяемый выражением

$$K_{\text{осл}} = \frac{S_{27,5}}{S_{27,5} + S_{10(35)} + S_{110}}$$

где  $S_{27,5}$ ,  $S_{10(35)}$  – максимальная мощность нагрузки головного трансформатора со стороны 27,5 кВ и 10 (35) кВ;

$S_{110}$  – максимальная мощность нагрузки, подключённой к РУ 110 кВ, в случае выдачи мощности в сеть 110 кВ, например, при подключении со стороны 10 (35) кВ объектов малой генерации (газотурбинных, газопоршневых электростанций, малых гидроэлектростанций и пр.)

Подключение ТСН со стороны 10 (35) кВ кроме положительного влияния на электромагнитную обстановку и совместимость на подстанции приведёт:

1. К улучшению качества электроснабжения релейных шкафов СЦБ от ВЛ СЦБ 10 кВ, подключаемой через трансформатор СЦБ к собственным нуждам тяговой подстанции;
2. К повышению надёжности электроснабжения релейных шкафов СЦБ от ВЛ СЦБ 10 кВ, поскольку в случае отключения РУ 27,5 кВ и, соответственно, линии ДПР 27,5 кВ, ВЛ СЦБ 10 кВ будет подключена через трансформатор СЦБ и ТСН к обмотке 10 (35) кВ головного трансформатора;
- 3) к уменьшению стоимости ТСН, в случае подключения ТСН со стороны 10 кВ, поскольку ТСН на класс напряжения 10 кВ стоит не менее чем 2,5 раза меньше по сравнению с ТСН на класс напряжения 35 кВ.

#### 4. ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В соответствии с п. 5 приложения Г к СТО 56947007-29.240.044-2010 [6], расчёты напряжённости электромагнитного поля для целей оценки электромагнитной обстановки и определения электромагнитной совместимости должны выполняться с использованием программы ЭМП ВЛ. Использование для расчёта напряжённости электромагнитного поля программы ЭМП ВЛ также отвечает требованиям ОАО "Газпром" [9].

Программа ЭМП ВЛ выполняет расчёт напряжённости электромагнитного поля на основе решения системы уравнений Максвелла, позволяет моделировать ошиновку любого РУ, симметричного и несимметричного, потому её можно использовать для оценки напряжённости электромагнитного поля от ошиновки несимметричного РУ 27,5 кВ. Погрешность расчётов, выполненных в программе ЭМП ВЛ, составляет не более 10%.

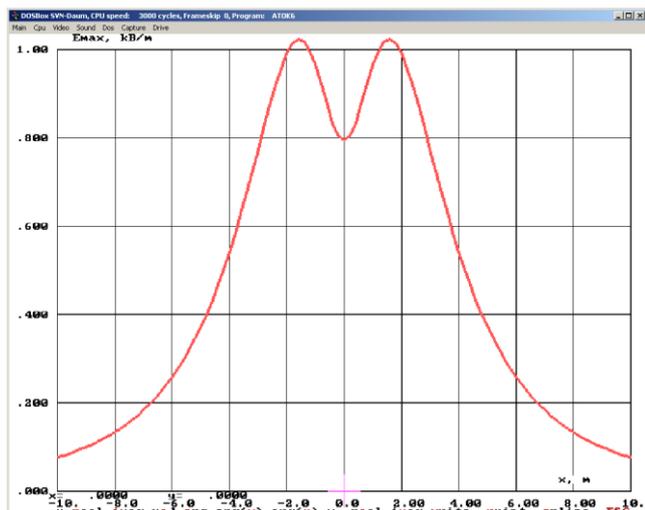
Для оценки влияния несимметрии расположения фаз ошиновки РУ 27,5 кВ в пространстве на напряжённость электромагнитного поля промышленной частоты в местах расположения микропроцессорных технических средств выполним сравнение напряжённости электромагнитного поля от симметричной ошиновки 35 кВ и от несимметричной ошиновки 27,5 кВ.

Расчётные параметры ошиновок 35 и 27,5 кВ примем одинаковыми (кроме напряжения), соответствующими типовой жёсткой ошиновке:

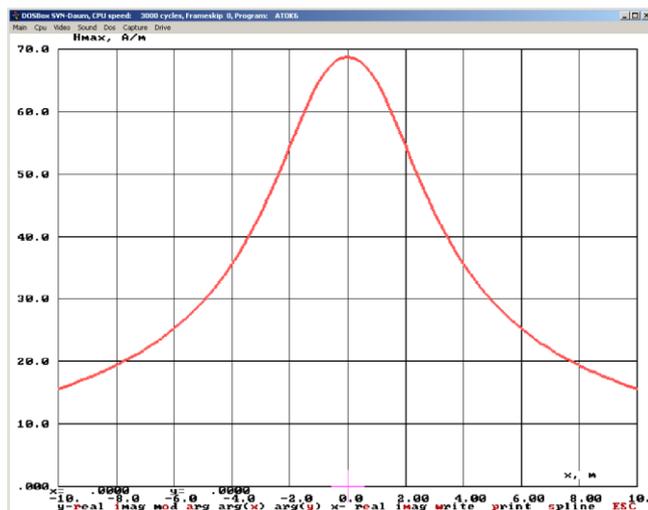
- максимальные рабочие токи – 1000 А;
- расстояние между фазами – 1 м;
- радиус ошиновки – 0,0108 м;
- высота расположения ошиновки относительно земли – 3,2 м.

Расчётная высота определения напряжённости электромагнитного поля – 1 м, в соответствии с ГОСТ Р 51317.2.5-2000 [3].

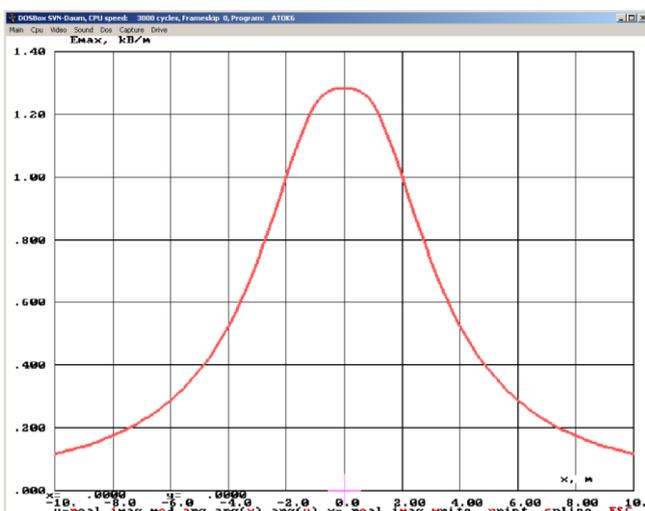
Результаты расчётов напряжённости электромагнитного поля в программе ЭМП ВЛ представлены на рис. 2-5.



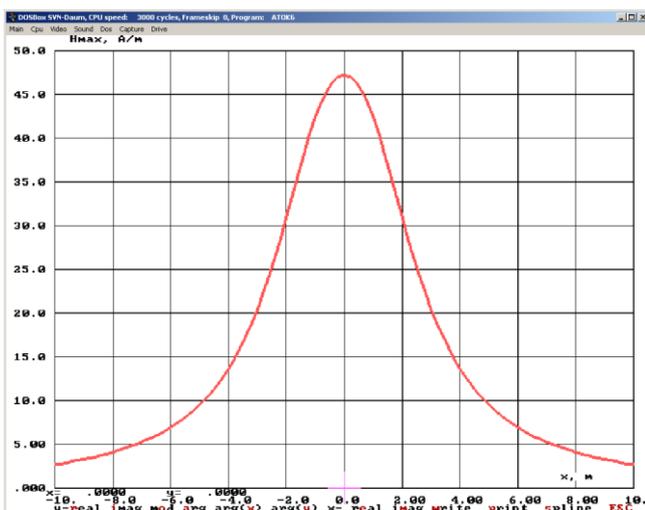
**Рис. 2.** Результаты расчёта напряжённости электрического поля под ошиновкой РУ 35 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки



**Рис. 5.** Результаты расчёта напряжённости магнитного поля под ошиновкой РУ 27,5 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки



**Рис. 3.** Результаты расчёта напряжённости электрического поля под ошиновкой РУ 27,5 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки



**Рис. 4.** Результаты расчёта напряжённости магнитного поля под ошиновкой РУ 35 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки

Как можно отметить по результатам расчётов, несимметричность конструкции РУ 27,5 кВ оказывает значительное влияние на напряжённость электромагнитного поля в местах расположения микропроцессорных средств:

1. Несмотря на меньшее напряжение (27,5 кВ по сравнению с 35 кВ), напряжённость электрического поля от ошиновки 27,5 кВ будет больше в 1,5 раза, что может иметь существенное значение для выбора уровня помехоустойчивости микропроцессорного оборудования к воздействию электрического поля по ГОСТ Р 51317.2.5-2000 [3]. В приведённом примере при расположении микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки 35 кВ достаточным является выбор 1 уровня помехоустойчивости к воздействию электрического поля (0,1 кВ/м), а при расположении подобного оборудования в 10 м от ошиновки 27,5 кВ потребуется выбирать оборудование, соответствующее 2 уровню помехоустойчивости к воздействию электрического поля (1 кВ/м).
2. Напряжённость магнитного поля от ошиновки 27,5 кВ будет в 5,8 раз больше напряжённости магнитного поля от ошиновки 35 кВ (при одинаковом токе в ошиновке), что также имеет существенное значение для выбора уровня помехоустойчивости микропроцессорного оборудования к воздействию магнитного поля промышленной частоты по ГОСТ Р 50648-94 [4]. В приведённом примере при расположении микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки 35 кВ достаточным является выбор 2 уровня помехоустойчивости к воздействию магнитного поля промышленной частоты (3 А/м), а при расположении подобного оборудования в 10 м от ошиновки 27,5 кВ потребуется выбирать оборудование, соответствующее 4 уровню помехоустойчивости к воздействию магнитного поля (30 А/м).

## ВЫВОДЫ

Для обеспечения благоприятной электромагнитной обстановки и совместимости на тяговых подстанциях переменного тока необходимо:

1. Разработать нормативный документ ОАО "РЖД" по обеспечению электромагнитной совместимости на тяговых подстанциях при проектировании и эксплуатации, аналогичный стандартам ОАО "ФСК ЕЭС" и ОАО "Газпром",

учитывающий особенности конструкции и схемно-режимной обстановки на тяговых подстанциях.

2. Для уменьшения несимметрии электропитания вторичных систем, повышения надёжности электроснабжения собственных нужд и ВЛ СЦБ 10 кВ, уменьшения стоимости основного оборудования подстанции при реконструкции и новом строительстве тяговых подстанций переменного тока следует подключать трансформаторы собственных нужд не с несимметричной стороны 27,5 кВ, а со стороны 10 (35) кВ головных трансформаторов.
3. Для обеспечения помехоустойчивости микропроцессорного оборудования тяговых подстанций переменного тока к воздействию электромагнитного поля следует обращать особое внимание на расположение данного оборудования относительно ошиновки 27,5 кВ, по результатам расчётов выбирать соответствующие электромагнитной обстановке уровни помехоустойчивости микропроцессорного оборудования к воздействию электромагнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 30372-95. *Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.*
2. ГОСТ 32144-2013. *Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.*
3. ГОСТ Р 51317.2.5-2000. *Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств*
4. ГОСТ Р 50648-94. *Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний*
5. СТО 56947007-29.240.043-2010. *Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов.* ОАО "ФСК ЕЭС", Москва 2010.
6. СТО 56947007-29.240.044-2010. *Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства.* ОАО "ФСК ЕЭС", Москва 2010.
7. СТО Газпром 2-1.11-290-2009. *Положение по обеспечению электромагнитной совместимости производственных объектов ОАО "Газпром".* ОАО "Газпром", Москва 2009.
8. РД 34.20.116-93. *Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех.* РАО "ЕЭС России", Москва 1993.
9. Циркуляционное письмо ЦП-0002-11-01 "Об обеспечении требований ЭМС", утверждённое начальником Управления энергетики Департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа ОАО "Газпром" В.В. Гоголюком от 28.03.2011.
10. Марквардт К.Г. *Справочник по электроснабжению железных дорог.* Транспорт, Москва 1980.
11. Почаевец В.С. *Электрические подстанции.* Желдориздат, Москва 2001.
12. Бадёр М.П. *Электромагнитная совместимость.* УМК МПС РФ, Москва 2002.
13. Волынцев В.В. *Электромагнитная совместимость тяговой сети с воздушными линиями связи при несинусоидальных потребителях электрической энергии*

*и наличии экранированных усиливающих проводов.* МИИТ, Москва 2003.

14. Бочарников Ю.В. *Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и аппаратуры рельсовых цепей при воздействии через питающие и сигнальные цепи.* МИИТ, Москва 2008.
15. Морозов П.В. *Повышение электромагнитной совместимости и качества функционирования систем электроснабжения переменного тока скоростных железных дорог.* НГТУ, Новосибирск 2013.
16. Афанасьев А.И., Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. и др. *Обеспечение электромагнитной совместимости на тяговых подстанциях переменного тока.* ПЭИПК, Санкт-Петербург 2006.

## KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA NA PODSTACJACH TRAKCYJNYCH PRĄDU ZMIENNEGO

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono analizę cech kompatybilności elektromagnetycznej na podstacjach trakcyjnych prądu zmiennego. Zidentyfikowano problem nieobecności szczegółowej regulacji normatywnej kwestii kompatybilności elektromagnetycznej na podstacjach trakcyjnych. Oferowana propozycja zasilania własnych potrzeb podstacji ze strony 10 kV transformatorów głównych. Wykonano ocenę wpływu prądów i napięcia rozdzielnic 27,5 kV na sprzęt mikroprocesorowy.*

Autor:

dr inż. **Aleksiej Kosjakow** – Uralski Państwowy Uniwersytet Transportu Kolejowego, "Alfa EMS" sp. z o.o., Jekaterynburg, Rosja