

УДК 621.331.3.025.1

Алексей Александрович Косяков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), ведущий инженер ООО «Альфа ЭМС», Екатеринбург, Антон Юрьевич Ершов, ведущий инженер ООО «Альфа ЭМС», Екатеринбург

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Alexey Alexandrovich Kosyakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Machinery, Urals State University of Railway Transport (USURT), Lead Engineer, LLC Alpha EMS, Ekaterinburg, Anton Yuriyevich Ershov, Lead Engineer, LLC Alpha EMS, Ekaterinburg

Electromagnetic compatibility of microprocessor hardware on AC traction substations

Аннотация

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 расчетная оценка влияния токов и напряжения в распределительных устройствах 27,5 кВ на микропроцессорные технические средства тяговой подстанции.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, тяговая подстанция, собственные нужды, несимметрия напряжений, электромагнитное поле.

Summary

The paper analyzes the specifics of electromagnetic compatibility on AC traction substations. The issues of normative regulation of electromagnetic compatibility measures have been analyzed. The measures to optimize auxiliary power supply of AC traction substations have been proposed. Estimate of the impact of current and voltage in 27.5 kV switchgear on microprocessor units of traction substation has been performed.

Keywords: electromagnetic compatibility, traction substation, auxiliaries, voltage unbalance, electromagnetic field.

В настоящее время отмечается нечеткость понимания термина «электромагнитная совместимость» предприятиями различных форм собственности, работающими в области электроэнергетики. В соответствии с ГОСТ 30372–95 [1] электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС) — это способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам. Однако ни этим стандартом, ни другой основной нормативной документацией не уточняется, какие именно технические средства и в какой электромагнитной обстановке должны функционировать с заданным качеством. Такая нечеткость определения приводит к тому, что под термином «электромагнитная совместимость» на объектах электроэнергетики понимают совершенно разные по сути процессы и явления, нередко объясняя неработоспособность оборудования ЭМС, например, по причинам:

- неправильного выбора уставок релейной защиты;
- неправильного выбора сечения проводов, кабелей;
- несимметричной нагрузки систем электроснабжения при подключении мощных однофазных нагрузок к трехфазной системе электроснабжения;

- нелинейной нагрузки систем электроснабжения, в частности, из-за неправильного выбора мощности электродвигателей, трансформаторов.

Как следует из приведенных примеров, неработоспособность оборудования связана с ошибками при выборе основного оборудования, а не с влиянием высоковольтного сильноточного оборудования на чувствительные к помехам микропроцессорные устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи, учета электроэнергии и пр., что подразумевают нормативные документы по обеспечению электромагнитной совместимости ОАО «ФСК ЕЭС» [2, 3] и ОАО «Газпром» [4], а также общий для всех объектов электроэнергетики нормативный документ РД 34.20.116-93 [5].

Конечно, если провод разрушится из-за превышения термической стойкости, то электромагнитная совместимость не будет обеспечена 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 [2–5] не является, однако из-за нечеткости определения электромагнитной совместимости специалисту по ЭМС нередко приходится разбираться во всех аспектах конструирования, проектирования и эксплуатации электрооборудования, т.е. быть своеобразным универсальным специалистом.

В системах электроснабжения железных дорог вопрос ЭМС традиционно рассматривается в разрезе обеспечения электромагнитной совместимости контактной сети и параллельно следующих линий связи [6, 7]. В конце 1990-х гг. на железных дорогах отмечалось расширенное применение термина «электромагнитная совместимость» [8, 9]. К вопросам ЭМС стали относиться:

электрохимзащиту подземных сооружений от действия блуждающих токов;

влияние гармоник тягового тока на работу железнодорожной автоматики и телемеханики, подключенной к рельсовым цепям;

повышение коэффициента мощности.

В настоящее время обеспечение электромагнитной совместимости на железнодорожном транспорте включает и такие аспекты, как:

несимметричная нагрузка трансформаторного оборудования тяговых подстанций переменного тока [10];

неправильная работа релейной защиты распределительных устройств (РУ) 27,5 кВ тяговых подстанций переменного тока при однофазных коротких замыканиях на стороне 110, 220 кВ [11] вследствие неправильного выбора уставок релейных защит.

Следует отметить, что все перечисленные проблемы электромагнитной совместимости касаются 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 все чаще, что связано с оснащением тяговых подстанций современным микропроцессорным оборудованием, чувствительным к помехам, вместо старого оборудования вторичных систем на базе электромеханических реле.

Следует признать неготовность ОАО «РЖД» (как крупнейшего собственника тяговых подстанций переменного тока) к решению вопросов ЭМС на тяговых подстанциях из-за отсутствия каких-либо нормативных документов, аналогичных стандартам ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «Газпром». В связи с этим обследование электромагнитной обстановки и совместимости на тяговых подстанциях приходится выполнять по стандартам ОАО «ФСК ЕЭС», не учитывающим специфику конструкции и режимов эксплуатации тяговых подстанций. Выводы данной статьи

основаны на анализе особенностей электромагнитной обстановки на тяговых подстанциях переменного тока, выявленных в ходе выполненного в 2013–2014 гг. ООО «Альфа ЭМС» обследования подстанций Мысовской дистанции электроснабжения Восточно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО «РЖД».

Основные источники электромагнитных воздействий на микропроцессорное оборудование тяговой подстанции переменного тока принципиально не отличаются от источников воздействий на подстанциях ОАО «ФСК ЕЭС» [2]. К ним относятся:

короткие замыкания на шинах подстанции и линиях электропередачи, являющиеся источником кондуктивных помех и токов в экранах контрольных кабелей;

импульсные наведенные и кондуктивные помехи при коммутациях и коротких замыканиях в первичных цепях;

импульсные помехи от токов молнии, наведенные с элементов молниезащиты;

обратное перекрытие с элементов молниезащиты;

электромагнитные поля промышленной частоты от ошиновки 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 упрощенной схемы тяговой подстанции [12] (рис. 1) и 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:

несимметрия напряжения электропитания вторичного оборудования вследствие несимметричной загрузки плеч питания контактной сети;

электромагнитные поля промышленной частоты из-за несимметрии расположения фаз ошиновки РУ 27,5 кВ в пространстве;

несинусоидальность напряжения электропитания вторичного оборудования вследствие работы выпрямительных преобразователей на электроподвижном составе (ЭПС) и искрения при контакте токоприемников ЭПС и проводов контактной сети.

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

однофазная тяговая нагрузка, подключенная со стороны 27,5 кВ;

несимметричная линия продольного электроснабжения «два провода — рельс» (ДПР) 27,5 кВ.

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

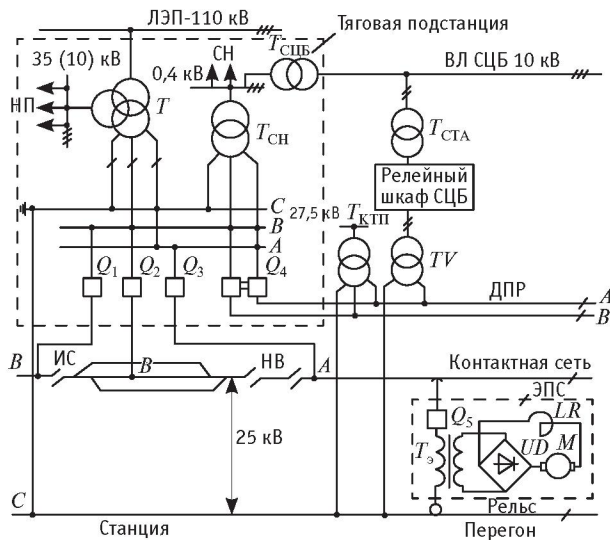


Рис. 1. Упрощенная схема тяговой подстанции переменного тока

К тяговой подстанции переменного тока подключаются также симметричные нагрузки:

нетяговая нагрузка со стороны 10 (35) кВ;

нагрузка собственных нужд, включая линию электропитания 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» [2, 3], предписывающими в части несимметрии токов и напряжений определять коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности и сравнивать их с допустимым по ГОСТ 32144–2013 [13] значением 2%.

Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности напряжения электропитания на тяговой подстанции переменного тока будет незначителен в связи с подключением ТСН со стороны обмотки 27,5 кВ головного трансформатора, соединенной в звезду без нулевого провода или треугольник. Соответственно для оценки электромагнитной обстановки и совместимости при подключении собственных нужд со стороны 27,5 кВ можно определять коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_2 на основе результатов тяговых расчетов загрузки плеч питания A , B и рельсового фидера C :

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

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 I_A , I_B , I_C — токи прямой и обратной последовательностей фидеров контактной сети A , B и рельсового фидера C ;

a — оператор поворота, $a = e^{j120^\circ}$.

Для адекватной оценки электромагнитной обстановки и совместимости представляется необходимым определить коэффициент несимметрии по обратной последовательности для нескольких режимов загрузки фидеров по тяговым расчетам. При отсутствии такой информации следует рассмотреть максимальные рабочие режимы одностороннего электропитания фидерных зон A и B , а также максимальный рабочий режим двустороннего электропитания фидерных зон A и B .

Следует отметить, что типовая схема тяговой подстанции переменного тока (см. рис. 1) неоптимальна с точки зрения ЭМС, поскольку 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, укрупненно определяемый выражением

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

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

S_{110} — максимальная мощность нагрузки, подключенной 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 приведет к:

улучшению качества электропитания релейных шкафов СЦБ от ВЛ СЦБ 10 кВ, подключаемой через трансформатор СЦБ к собственным нуждам тяговой подстанции;

повышению надежности электропитания 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;

уменьшению стоимости ТСН в случае подключения ТСН со стороны 10 кВ, поскольку стоимость ТСН на класс напряжения 10 кВ не менее чем в 2,5 раза ниже стоимости ТСН на класс напряжения 35 кВ.

В соответствии с п. 5 приложения Г к СТО 56947007-29. 240.044-2010 [3] расчеты напряженности электромагнитного поля для оценки электромагнитной обстановки и определения

электромагнитной совместимости должны выполняться с использованием программы ЭМП ВЛ. Применение для расчета напряженности электромагнитного поля программы ЭМП ВЛ также отвечает требованиям ОАО «Газпром» [14].

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

Для оценки влияния несимметрии расположения фаз ошиновки РУ 27,5 кВ в пространстве на напряженность электромагнитного поля промышленной частоты в местах расположения

микропроцессорных технических средств выполним сравнение напряженности электромагнитного поля от симметричной ошиновки 35 кВ и от несимметричной ошиновки 27,5 кВ.

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

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

Расчетная высота определения напряженности электромагнитного поля — 1 м, согласно ГОСТ Р 51317.2.5–2000 [15].

Результаты расчетов напряженности электромагнитного поля в программе ЭМП ВЛ представлены на рис. 2–5 и в табл. 1.

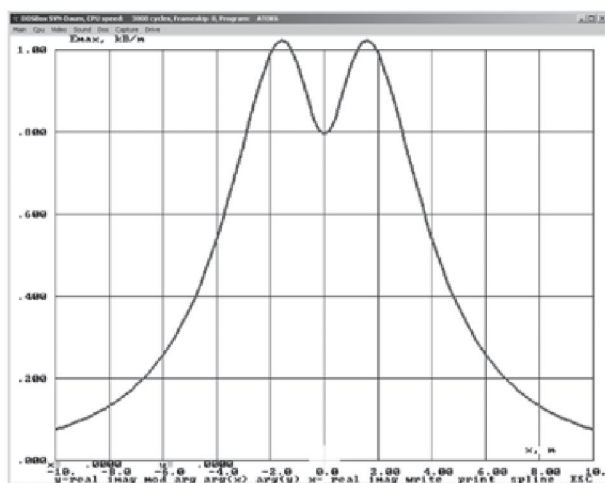


Рис. 2. Результаты расчета напряженности электрического поля под ошиновкой РУ 35 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки

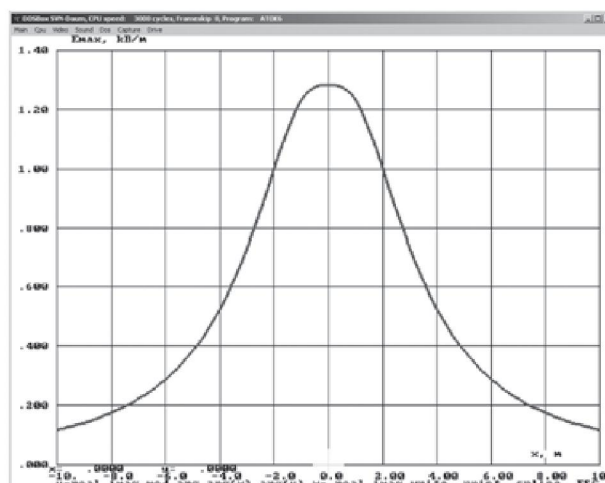


Рис. 3. Результаты расчета напряженности электрического поля под ошиновкой РУ 27,5 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки

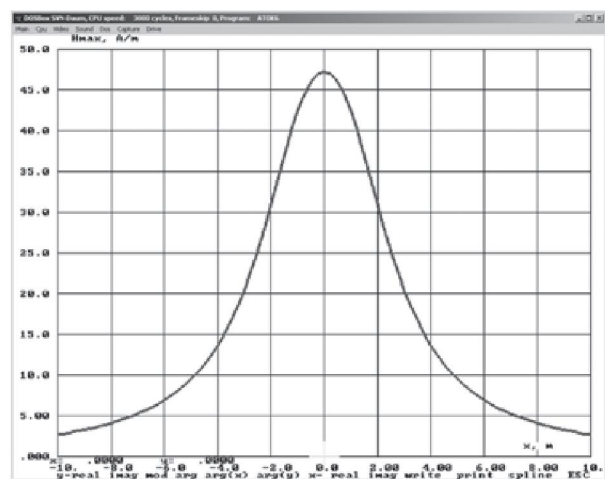


Рис. 4. Результаты расчета напряженности магнитного поля под ошиновкой РУ 35 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки

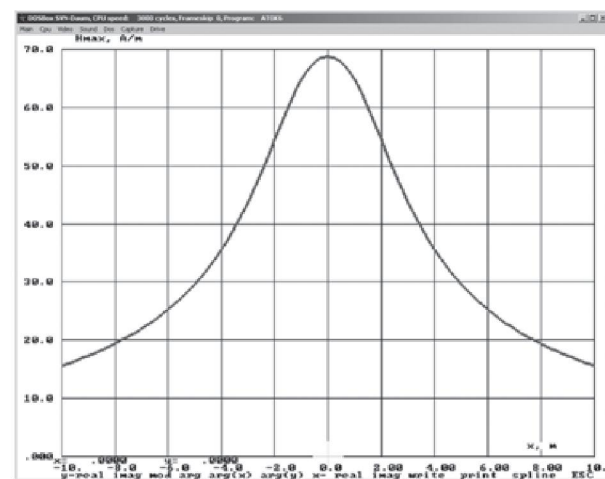


Рис. 5. Результаты расчета напряженности магнитного поля под ошиновкой РУ 27,5 кВ и в местах расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки

Таблица 1

Результаты расчета напряженности
электрического и магнитного поля частоты 50 Гц

Расчетная точка	РУ, кВ	E , кВ/м	H , А/м
Под ошиновкой — максимальные значения напряженности электромагнитного поля	35	1,024	47,18
	27,5	1,281	70
В месте расположения микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки	35	0,07663	2,684
	27,5	0,1156	15,53

Как можно отметить по результатам расчетов, несимметричность конструкции РУ 27,5 кВ (двухфазная ошиновка) оказывает значительное влияние на напряженность электромагнитного поля в местах расположения микропроцессорных средств.

Несмотря на меньшее напряжение (27,5 кВ по сравнению с 35 кВ), напряженность 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 [15]. В приведенном примере при расположении микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки 35 кВ достаточным является выбор 1-го 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-му уровню помехоустойчивости к воздействию электрического поля (1 кВ/м).

Напряженность магнитного поля от ошиновки 27,5 кВ будет в 5,8 раз больше напряженности магнитного поля от ошиновки 35 кВ (при одинаковом токе в ошиновке), что также имеет существенное значение для выбора уровня помехоустойчи-

вости микропроцессорного оборудования к воздействию магнитного поля промышленной частоты по ГОСТ Р 50648–94 [16]. В приведенном примере при расположении микропроцессорных технических средств в 10 м от ошиновки 35 кВ достаточным является выбор 2-го 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-му уровню помехоустойчивости к воздействию магнитного поля (30 А/м).

Таким образом, для обеспечения благоприятной электромагнитной обстановки и совместимости на тяговых подстанциях переменного тока необходимо следующее.

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 надежности электроснабжения собственных нужд и ВЛ СЦБ 10 кВ, снижения стоимости основного оборудования 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. Чтобы обеспечить помехоустойчивость микропроцессорного оборудования тяговых подстанций переменного тока к воздействию электромагнитного поля, требуется обращать особое внимание на расположение данного оборудования относительно ошиновки 27,5 кВ, по результатам расчетов выбирать соответствующие электромагнитной обстановке уровни помехоустойчивости микропроцессорного оборудования к воздействию электромагнитного поля.

Литература

- ГОСТ 30372–95. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Минск : Стандартиформ, 2005. 144 с.
- СТО 56947007–29.240.043–2010. Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов / ОАО «ФСК ЕЭС». М., 2010. 26 с.
- СТО 56947007–29.240.044–2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства / ОАО «ФСК ЕЭС». М., 2010. 148 с.
- СТО Газпром 2-1.11-290–2009. Положение по обеспечению электромагнитной совместимости производственных объектов ОАО «Газпром» / ОАО «Газпром». М., 2009. 30 с.
- РД 34.20.116–93. Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех / РАО «ЕЭС России». М., 1993.
- Марквардт К. Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. I. М. : Транспорт, 1980. 257 с.

References

- GOST 30372–95. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya [Compatibility of technical equipment. Terms and definitions]. Minsk : Standartinform, 2005. 144 p.
- STO 56947007–29.240.043–2010. Rukovodstvo po obespecheniyu elektromagnitnoy sovmestimosti vtorichnogo oborudovaniya i sistem svyazi elektrosetyevykh obyektov [Electromagnetic compatibility guidelines of secondary equipment and communication systems of power grid facilities] / ОАО «FSK EES». M., 2010. 26 p.
- STO 56947007–29.240.044–2010. Metodicheskie ukazaniya po obespecheniyu elektromagnitnoy sovmestimosti na obyektakh elektrosyevogo khozyaystva [Electromagnetic compatibility guidelines at power grid facilities] / ОАО «FSK EES». M., 2010. 148 p.
- STO Gazprom 2-1.11-290–2009. Polozhenie po obespecheniyu elektromagnitnoy sovmestimosti proizvodstvennykh obyektov ОАО «Gazprom» [Regulations on electromagnetic compatibility at production facilities of JSC Gazprom] / ОАО «Gazprom». M., 2009. 30 p.
- RD 34.20.116–93. Metodicheskie ukazaniya po zashchite vtorichnykh tsepey elektricheskikh stantsiy i podstantsiy ot impulsnykh pomekh [Guidelines for protection of secondary circuits of power stations and substations from burst interference] / RAO «EES Rossii». M., 1993.

7. Волынцев В. В. Электромагнитная совместимость тяговой сети с воздушными линиями связи при несинусоидальных потребителях электрической энергии и наличии экранированных усиливающих проводов. М. : МИИТ, 2003. 157 с.
8. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. М. : УМК МПС РФ, 2002. 638 с.
9. Бочарников Ю. В. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и аппаратуры рельсовых цепей при воздействии через питающие и сигнальные цепи. М. : МИИТ, 2008. 176 с.
10. Морозов П. В. Повышение электромагнитной совместимости и качества функционирования систем электроснабжения переменного тока скоростных железных дорог. Новосибирск : НГТУ, 2013. 232 с.
11. Обеспечение электромагнитной совместимости на тяговых подстанциях переменного тока / А. И. Афанасьев, Г. А. Евдокунин, М. В. Дмитриев и др. // Электромагнитная совместимость ГЭС и ГАЗС. СПб. : ПЭИПК, 2006. С. 18–28.
12. Пochaевец В. С. Электрические подстанции. М. : Желдориздат, 2001. 512 с.
13. ГОСТ 32144–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : Стандартинформ, 2014. 16 с.
14. Об обеспечении требований ЭМС : циркулярное письмо ЦП-0002-11-01 от 28.03.11 / утв. Управлением энергетики Департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа ОАО «Газпром» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.google.com/viewer?url=http://www.proektant.org/index.php?action=dlattach;topic=32482.0;attach=35171> (дата обращения: 18.03.2015).
15. ГОСТ Р 51317.2.5–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. М. : Изд-во стандартов, 2001. 40 с.
16. ГОСТ Р 50648–94. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний. М. : Изд-во стандартов, 2004. 16 с.
6. Markvardt K. G. Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog. T. I [Handbook on railway power supply. Vol. I]. M. : Transport, 1980. 257 p.
7. Volyntsev V. V. Elektromagnitnaya sovmestimost tyagovoy seti s vozdushnymi liniyami svyazi pri nesinusoidalnykh potrebitelyakh elektricheskoy energii i nalichiiy ekranirovannykh usilivayushchikh provodov [Electromagnetic compatibility of traction network with overhead communication lines with non-sinusoidal consumers of electric power and presence of shielded amplification wires]. M. : MIIT, 2003. 157 p.
8. Bader M. P. Elektromagnitnaya sovmestimost [Electromagnetic compatibility]. M. : UMK MPS RF, 2002. 638 p.
9. Bochamnikov Yu. V. Elektromagnitnaya sovmestimost sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i apparatury relsovykh tsepey pri vozdeystvii cherez pitayushchie i signalnye tsepi [Electromagnetic compatibility of traction power supply system and track circuits equipment when influenced through supply and signal circuits]. M. : MIIT, 2008. 176 p.
10. Morozov P. V. Povyshenie elektromagnitnoy sovmestimosti i kachestva funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya peremennogo toka skorostnykh zheleznykh dorog [Improving electromagnetic compatibility and quality of functioning of AC power systems on high-speed railways]. Novosibirsk : NGTU, 2013. 232 p.
11. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti na tyagovykh podstantsiyakh peremennogo toka [Electromagnetic compatibility on AC traction substations] / A. I. Afanasiev, G. A. Evdokunin, M. V. Dmitriev i dr. // Elektromagnitnaya sovmestimost GES i GAES. SPb. : PEIPK, 2006. P. 18–28.
12. Pochaevets V. S. Elektricheskie podstantsii [Electrical substation]. M. : Zhel-dorizdat, 2001. 512 p.
13. GOST 32144–2013. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Compatibility of technical equipment. Standards of quality of electric energy in power systems for general use]. M. : Standartinform, 2014. 16 p.
14. Ob obespechenii trebovaniy EMS : tsirkulyarnoe pismo TsP-0002-11-01 ot 28.03.11 [On electromagnetic compatibility requirements : a circular letter TsP-0002-11-01 of 28.03.11] / utv. Upravleniem energetiki Departamenta po transportirovke, podzemnomu khraneniyu i ispolzovaniyu gaza ОАО «Газпром». [Electronic resource]. URL: <https://docs.google.com/viewer?url=http://www.proektant.org/index.php?action=dlattach;topic=32482.0;attach=35171> (date accessed: 18.03.2015).
15. GOST R 51317.2.5–2000. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Elektromagnitnaya obstanovka. Klassifikatsiya elektromagnitnykh pomekh v mestakh razmeshcheniya tekhnicheskikh sredstv [Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electromagnetic environment. Classification of electromagnetic interference at hardware location]. M. : Izd-vo standartov, 2001. 40 p.
16. GOST R 50648–94. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoychivost k magnitnomu polyu promyshlennoy chastoty. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy [Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity to power frequency magnetic field. Technical requirements and test methods]. M. : Izd-vo standartov, 2004. 16 p.