

## Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК: 621.396:519.853+504.75

С. М. Аполлонский  
ОАО «Ленгипротранс»

### ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СИСТЕМЕ

Дата поступления 04.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 22.12.2015

*Аннотация:* Рассмотрены проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетической железнодорожной системе, обсуждаются пути их решения.

*Ключевые слова:* электромагнитное поле, электромагнитная совместимость электрооборудования, электромагнитная среда, электромагнитная обстановка, электромагнитная безопасность технических средств.

**Stanislav M. Apollonskiy**

Open Joint Stock Company “LENGIPROTRANS”

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN  
ELECTRICITY OF RAIL SYSTEM

*Abstract:* Problems of electromagnetic compatibility on electrified railways are sharper than in the stationary energy sector. This is due to the following circumstances:

1. Electrified railways has considerable length in space and is usually located in different climatic and in geological zones.

2. In rail transport, as well as any other transport systems, a compact high-performance equipment used (high and low voltage), to a greater degree of exposure to external electromagnetic influences than in the stationary energy sector.

3. All processes (stationary and non-stationary) on an electrified rail, in one way or another, affect the operation of each of the elements of the system.

4. In the development of an extensive electrified railway is necessary to ensure the electromagnetic compatibility of each of the elements that are not always required in the stationary energy sector.

5. Problems of electromagnetic compatibility electrified railways significantly of more complicated, when are using magnetolevitatsionnyh technologies for elektrozhdvizhenie.

Considered the problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system, are discussed ways of solving them.

*Keywords:* electromagnetic field, electromagnetic compatibility of electrical equipment, electromagnetic environment, electromagnetic security technology.

## Введение

Проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) в электроэнергети-ческой железнодорожной системе (ЭЭЖС) стоят острее, чем в стационарной энергетике. Связано это со следующими обстоятельствами [1]:

1. ЭЭЖС имеет значительную протяжённость в пространстве и, как правило, располагается в различных климатических и геологических зонах.

2. На железнодорожном транспорте, как и в любых других транспортных системах, используется *компактное* высокоэффективное оборудование (силовое и слаботочное), в большей степени подверженное внешним электромагнитным воздействиям, чем в стационарной энергетике.

3. Все процессы (стационарные и нестационарные) в ЭЭЖС, в той или иной мере, отражаются на работе каждого из элементов системы.

4. При создании разветвлённой ЭЭЖС необходимо обеспечить ЭМС каждого из элементов, что не всегда требуется в стационарной энергетике.

5. Проблемы ЭМС в ЭЭЖС существенно усложняются при использовании магнитолевитационных технологий при электродвижении.

Ниже рассмотрены основные проблемы ЭМС технических средств в ЭЭЖС и пути их преодоления.

### **Электроэнергетическая система электрифицированной железной дороги**

Основными элементами ЭЭС железной дороги, электрифицированной на переменном токе, являются линии электропередачи (ЛЭП), тяговые подстанции (ТПС), контактная и рельсовая сети, электроподвижной состав (ЭПС). ТПС служат для поддержания рабочего напряжения в контактной сети. На подстанции идёт преобразование переменного тока высокого напряжения, получаемого из высоковольтных ЛЭП, в переменный ток напряжения, принятого для питания ЭПС.

При расчете электромагнитного воздействия на окружающую среду в расчет следует принимать как ЛЭП всех видов, контактные сети, ЭПС, так и высокочувствительное оборудование (линии стационарной и поездной радиосвязи, системы управления, телевизионные системы и т.п.). Расположены те и другие, как правило, на небольших расстояниях и влияют друг на друга. Поэтому проблемы ЭМС в ЭЭЖС относительно внутренних связей и связей с окружающим пространством, выдвигаются на первое место.

При создании ЭЭЖС следует учитывать, что мощности источников электромагнитных полей (ЭМП): контактные сети, ТПС и др. – соизмеримы с мощностью подключаемых приемников – потребителей электрической энергии, а поэтому следует обязательно учитывать их взаимовлияние.

На расстоянии от источника помех менее длины волны данной частоты ЭМП имеет ярко выраженный электрический и магнитный характер. Частоты ЭМП в диапазоне от нескольких герц до десятков-сотен килогерц характерны для ЭЭЖС с электромагнитными волнами, поэтому электромагнитные связи между источниками помех и приемниками помех осуществляются за счет либо электрических, либо магнитных полей (ЭП, МП). Пути распространения помех в ЭЭЖС – например, в схемах управления электроприводами, радиотелевизионных установках, системах управления высокочувствительной электронной техникой – разделяют на гальванические, электростатические и магнитостатические. Пути распространения помех представляют собой линии связи с распределенными параметрами.

Рассмотрение особенностей электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения показало, что наличие элементов с распределенными параметрами (ЛЭП, тяговая сеть) предполагает появление волновых процессов. Последние значительно усложняют течение электромагнитных процессов, происходящих в системе электроснабжения, и могут приводить к резонансам одновременно на нескольких частотах [2].

### **Формирование электромагнитной среды на электрифицированной железной дороге**

*Климатические особенности района.* Распределение ЭМП в воздушной среде зависит не только от инфраструктуры окружающего пространства, но и от его электромагнитных параметров: электрической проводимости  $\gamma_B$ , магнитной  $\mu_B$  и диэлектрической  $\epsilon_B$  проницаемостей [3].

Анализ влияния изменения этих параметров на электромагнитные процессы в зависимости от метеорологических условий и от практической деятельности человека показывает:

1. Процессы индустриализации, урбанизации и других видов практической деятельности человека приводят к существенным изменениям электрической проводимости по регионам, увеличению магнитной и диэлектрической проницаемостей.

2. Возведение высоких объектов приводит к изменению зарядов генерирующих процессов, а также к изменению распределения зарядов и грозовой активности в облаках.

3. Случайное изменение атмосферного электричества в воздушной среде может вызвать изменения некоторых метеорологических процессов. Например, изменения ЭП в воде и в грозовых облаках изменяют процессы взаимодействия в среде, терминальные скорости и форму капли воды приводят к изменению процессов взаимодействия в среде, терминальных скоростей и формы капли воды. Такие изменения могут ускорить или изменить эволюцию атмосферных осадков и таким образом повлиять на динамику облаков.

Параметры  $\gamma_B$ ,  $\mu_B$ ,  $\epsilon_B$  воздушной среды существенно меняются в местах природных катаклизмов: скопления грозовых туч, очагов зарождения воздушных вихрей, в районах землетрясений и т.д. Риск попадания в места повышенной опасности высок, особенно в районах предполагаемых землетрясений, ибо параметры  $\gamma_B$ ,  $\mu_B$ ,  $\epsilon_B$  начинают меняться задолго до землетрясения, о котором порой никто не догадывается [3,4]. Так, например, механические напряжения, накапливающиеся в земной коре перед землетрясением, сопровождаются ростом напряженностей ЭП. Причем чем ближе к будущему эпицентру, тем больше. Если средняя напряженность ЭП над поверхностью Земли составляет 120-140 В/м, то за день до катаклизма – до нескольких сотен тысяч В/м. Это можно видеть невооруженным глазом: начинают светиться горы, земля, электропроводы. В момент толчка над эпицентром на несколько секунд возникает ярчайшая вспышка. Столь наэлектризованная атмосфера влияет на все виды высокочувствительных электронных систем (в том числе и на бортовые системы ЭПС).

**Качество электроэнергии в ЛЭП.** Система стандартизации качества электроэнергии в ЭЭС общего назначения непосредственно не касается электрических сетей специального назначения, к которым относятся контактные тяговые сети, и носит в этом случае рекомендательный характер [КЭ ГОСТ Р 54149-2010]. В то же время для напряжений в тяговых сетях существует государственный стандарт, устанавливающий номинальный уровень напряжения на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций переменного тока, а также минимальный, номинальный и максимальный уровни напряжения на токоприемнике ЭПС. В соответствии с ГОСТ 6962-75 [5], для электрифицированных дорог при системе тяги на однофазном токе промышленной частоты номинальное напряжение на шинах подстанции принято равным 27,5 кВ. Номинальное напряжение на токоприемнике ЭПС установлено в 25 кВ. С учетом специфических особенностей работы электрифицированных железных дорог,

закрывающихся в постоянном изменении напряжения на шинах подстанции, стандартом установлены максимальные и минимальные значения напряжения на токоприемнике ЭПС переменного тока. Максимальное напряжение на токоприемнике составляет 29 кВ, а минимальное – 19 кВ при всех эксплуатационных условиях. Более того, Министерством путей сообщения установлено минимальное напряжение в условиях эксплуатации при нормальной схеме питания. В этом случае, согласно «Правилам технической эксплуатации железных дорог», напряжение на токоприемнике ЭПС при нахождении его на любом блок-участке должно быть не менее 21 кВ. При этом будет выполнено условие обеспечения участковых скоростей, заложенных в графике движения ЭПС.

Как видно, максимальное отклонение напряжения на токоприемнике ЭПС, регламентированное ГОСТом, составляет +16% и -24%. Для сравнения, в сетях общего назначения, согласно «Правилам устройств электроустановок» (ПЭУ), отклонение напряжения на зажимах электродвигателей от номинального не должно превышать  $\pm 5\%$ , максимальное отклонение допускается в большую сторону – +10%. Для точек общего присоединения в системах электроснабжения общего назначения, к которым присоединяются электрические сети потребителей электрической энергии, согласно КЭ ГОСТ Р 54149-2010, установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$  не должно превышать  $\pm 10\%$ . Таким образом, требования к качеству напряжения в электротяговых сетях менее жесткие, чем в электрических сетях общего назначения.

Для обеспечения эффективной работы ЭПС необходимо при всех возможных режимах системы электрической тяги поддерживать на токоприемнике номинальный уровень напряжения 25 кВ, на который рассчитано электрооборудование ЭПС. При этом повышается коэффициент полезного действия ЭПС, снижается расход электроэнергии. В современных условиях обеспечить снижение величины отклонения напряжения от номинального значения возможно путем включения устройств автоматического регулирования напряжения трансформаторов тяговых подстанций (АРПН) и внедрения адаптивных микропроцессорных регуляторов напряжения с использованием модернизированной аппаратуры управления режимом работы оборудования ТПС.

Работа преобразовательных установок ЭПС переменного тока зависит не только от изменения величины напряжения, но и от формы кривой напряжения на токоприемнике. При сильном искажении кривой напряжения происходят сбои в системе управления преобразователем, что нарушает работу двигателей ЭПС. В этой связи целесообразно разработать прямые или косвенные нормативы, связанные с формой кривой

напряжения, соблюдение которых будет гарантировать надежную работу ЭПС.

Результаты работ по разработке нормативов, связанных с формой кривой напряжения на токоприемнике ЭПС, показали, что форма кривой напряжения в токоприемнике определяется типом ЭПС и величиной полного сопротивления системы электроснабжения. При этом если тип ЭПС обуславливает характер искажений (провалы), то сопротивление системы электроснабжения – величину искажений, а также частоту свободных колебаний, вызванных воздействием ЭПС на систему электроснабжения. Установлено, что при большом сопротивлении системы тягового электроснабжения во время коммутации преобразователя резко уменьшается напряжение на токоприемнике ЭПС. После окончания коммутации преобразователя напряжение скачком восстанавливается, однако при этом из-за резких изменений напряжения возникают и усиливаются гармонические составляющие, искажающие форму питающего напряжения.

Процесс коммутации характерен для вентильных электроприводов, имеющих реактивные элементы, способные накапливать ЭМП. У ЭПС с диодными преобразователями единственная в полупериоде коммутация начинается в момент перехода питающего напряжения через нулевую линию, и поэтому гармоники, появляющиеся при этом, имеют небольшую амплитуду. У ЭПС с тиристорными преобразователями в течение одного полупериода может быть несколько коммутаций при разном мгновенном значении напряжения. При этом свободные колебания возникают после начала и после окончания каждой коммутации и могут характеризоваться большими амплитудами.

Теоретически степень искажения формы кривой напряжения обусловлена величиной индуктивности и емкости системы электроснабжения от шин бесконечно большой мощности до токоприемника ЭПС – с одной стороны, и работой коммутационной силовой аппаратуры ЭПС – с другой. Учитывая, что ЭПС неотделим от системы тягового электроснабжения, при рассмотрении их как единого целого, принято решение: на основании опыта эксплуатации установить сопротивление системы электроснабжения не более 30 Ом. Такое значение максимального сопротивления системы электроснабжения принято в качестве норматива в новой редакции ГОСТ 6962-75 с изменением № 1 (постановление Комитета стандартизации и метрологии СССР № 1718 от 11.11.91).

Экспериментальные исследования, выполненные на участке Байкало-Амурской магистрали [6], показали, что степень качества напряжения в тяговой сети и, соответственно, на токоприемнике ЭПС изменяется в

самых широких пределах в зависимости от схемы внешнего и тягового электроснабжения, параметров тяговой сети и режимов работы ЭПС. Подтверждены факты существенного искажения формы кривой напряжения на токоприемнике ЭПС при консольном питании тяговой сети. Одной из причин этого являются повышенные индуктивное сопротивление и емкость системы электроснабжения, обусловленные большой протяженностью ЛЭП внешнего электроснабжения и режимом консольного питания межподстанционной зоны. В этих условиях наблюдалось нарушение нормальной работы блока управления выпрямительно-инверторным преобразователем, вызванное появлением дополнительных переходов кривой питающего напряжения нулевой линии в течение каждого полупериода основной частоты. В целом, проведенный анализ выявил неудовлетворительность качества электрической энергии в соответствии с действующим на время эксперимента ГОСТ 13109-67 на шинах тяговых и районных потребителей тяговой подстанции «Звездная». При этом источниками высших гармоник оказались как тяговая нагрузка, так и промышленные предприятия, имеющие общую с тяговой подстанцией систему электроснабжения напряжением 220 кВ.

### **Основные помехи в тяговой сети электрифицированной железной дороги**

*ЭМП помехи при некачественном токосъёме.* При скольжении съёмного полоза по тяговому проводу меняется величина площади касания, меняется плотность тока в контакте. Наличие резонансных частот в системе токосъема ( $f = 1-2$  Гц) приводит к отрыву контакта пантографа от тягового провода. Возникающий зазор может составлять от десятых долей мм до нескольких мм. В месте токосъема возникает электрическая дуга, излучающая широкий спектр частот ЭМП [7].

При токосъеме электроэнергии с контактной сети возможен поверхностный разряд. Такие разряды в условиях экспериментов возникают в воздухе при атмосферном давлении уже при напряжении выше 6 кВ (при ёмкости  $C=1$  мкФ). Поскольку напряжение в контактной сети значительно превышает эту величину ( $\geq 27,5$  кВ), то возможно формирование плазменных каналов, движущихся навстречу друг другу от контактного провода и токосъёмника ЭПС. При определенных условиях (достаточном напряжении и емкости) плазменный лидер перекрывает весь разрядный промежуток и происходит переход к зажиганию импульсного дугового разряда [7]. Дуговой разряд, возникающий между контактной сетью и токосъёмом ЭПС, стабилизируется под влиянием её взаимодействия с МП, созданным контактной сетью (см., например, [8]).

Однако полной стабилизации можно добиться лишь при выполнении определенных условий: при коаксиальной схеме подвода тока и определенных соотношениях между размерами электродов и проводимостями. В реальных условиях нам приходится иметь дело с электрической дугой в нестабильном состоянии. И хотя спектр излучаемых ею частот не превышает 2,0 МГц [9], наложение этого спектра на спектр высокочастотных помех линий электропередачи (к ним можно отнести ЛЭП, линии ДПР и продольного электроснабжения) может создать помехи телевизионных частот (до 100 МГц).

На пути распространяющихся высокочастотных ЭМП лежит разветвленная сеть контактных сетей, которые создают на пути полей сетчатый экран с ячейками больших размеров. В результате интерференции и дифракции возникают гармоники более высоких частот, которые попадают на принимающие антенные устройства теле- и радиосвязи.

**Широкополосные ЭМП помехи, возникающие при отражении от сетчатых структур.** Силовые ЛЭП (110, 220 кВ), питающие провода системы 2х27,5 кВ и др., создают помехи, дифрагирующие на сетчатых структурах системы заземления опор под оборудование на территории ТПС.

Существенное влияние на распределение полей вблизи таких сетчатых структур может оказать параллельная ей и расположенная в непосредственной близости слоистая среда (например, поверхность полотна железной дороги). Аналитическое исследование влияния свойств почвы и слоя снега на распределение полей вблизи сетчатых структур показало, что наиболее опасными являются случаи «резонансных» высот сетчатой поверхности [1] ( $h = n \cdot 0,5\lambda$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ). При высоте подвеса контактной сети  $h \approx 6,0-6,5$  м попадаем в зону «резонансных» высот для частоты 49,57 МГц, при  $\lambda_2 \approx 4$  м – 76,84 МГц, при  $\lambda_3 \approx 3$  м – 92,10 МГц.

Значительное влияние на распределение ЭМП, излучаемых ЛЭП, могут оказывать находящиеся на пути распространения железобетонные строения с металлическим каркасом, которые также играют роль сетчатой структуры.

**Коммутационные процессы и ЭМП от работающего электрооборудования** – это второй по степени влияния источник импульсных помех, воздействующий на микропроцессорные системы устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) в обычных условиях эксплуатации.

Источниками коммутационных помех являются, как правило, высоковольтные выключатели и разъединители, низковольтные реле и контакторы, управляемые батареи конденсаторов. Мощные преобразователи частоты электроприводов, коронный разряд,



электроискровые технологии считаются источниками ЭМП, опасными для электронной аппаратуры. При этом пути проникновения помех в микропроцессоры могут быть разными: от прямых индуктированных наводок на провода и кабели вторичных цепей подстанций (рис. 1) [6] до импульсных и высокочастотных перенапряжений, возникающих во вторичных обмотках трансформаторов тока и напряжения.

Чем меньше время горения дуги при размыкании высоковольтной цепи коммутационным аппаратом, тем большую амплитуду имеют наведенные перенапряжения во вторичных цепях. Поэтому источниками самых больших перенапряжений являются вакуумные, элегазовые и масляные выключатели, а замыкают этот ряд воздушные выключатели. Этим обусловлена и разница в количестве повреждений микропроцессоров, возникающих при работе выключателей и разъединителей с элегазовой и воздушной изоляцией.

Следует отметить, что высоковольтные помехи могут наводиться в контрольных кабелях также при коммутации низковольтных цепей, особенно тех, в которых имеются индуктивности. При этом характер коммутационного переходного процесса зависит от большого количества факторов, из-за чего наведенные напряжения могут сильно отличаться даже на одной и той же ТПС. Теоретические расчеты таких перенапряжений связаны с большими трудностями, поэтому наиболее простой способ – непосредственные замеры.

Значительные перенапряжения, трансформируемые во вторичные цепи, возникают также при коммутации батарей конденсаторов.

Эффективной мерой борьбы с наведенными перенапряжениями на входах электронной аппаратуры и на ее зажимах питания является использование элементов с нелинейной характеристикой: газовых разрядников, варисторов, специальных полупроводниковых элементов на основе стабилитронов и других устройств, включаемых параллельно защищаемому объекту (например, параллельно входу микропроцессорного устройства релейной защиты (МУРЗ)) и между каждой клеммой этого объекта и «землей». Наилучшими характеристиками обладают на данный момент резисторы с нелинейной характеристикой, выполненные из прессованного порошка оксида цинка ZnO (реже – из карбида кремния, титаната бария и других материалов), – варисторы, которые и получили наибольшее распространение. Варисторы должны быть правильно выбраны. К сожалению, часто приходится наблюдать ситуацию, при которой варисторы даже в аппаратуре ведущих мировых производителей выбраны неверно и никакими защитными функциями фактически не обладают. Поскольку вольтамперная характеристика (ВАХ) варистора далеко не идеальна, правильно выбрать его не так-то просто.

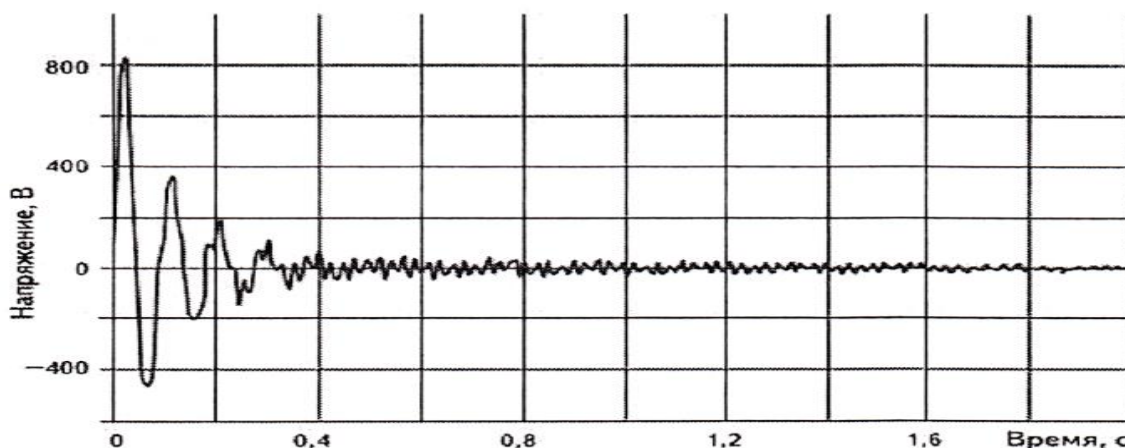


Рис. 1. Напряжение относительно «земли», наведенное в низковольтном контрольном кабеле в результате коммутационного процесса в цепи

**Грозовые разряды** являются самым мощным источником импульсных воздействий на аппаратуру ТПС. Напряжение молнии может составлять до ста миллионов вольт. В нормах строительства «громоотводов» принимают обычно ток молнии до 200 кА при длительности порядка 1 мс, хотя практически ток молнии редко превышает 20-30 кА. Температура канала при главном разряде может превышать 25000°C. Длина канала молнии – от 1 до 10 км, диаметр – несколько см. При ударе молнии в молниеотвод электрический ток (в виде импульса колоколообразной формы, рис. 2) поступает в землю и растекается в грунте во все стороны до сотен метров, причем из-за сопротивления грунта этот ток создает на нём падение напряжения. Поскольку наибольшее сопротивление оказывают слои почвы, лежащие вблизи места вхождения тока в землю, то именно здесь наблюдается самое высокое напряжение. По мере удаления от этой точки сопротивление прохождению тока уменьшается, при этом снижается и напряжение.

Для снижения потенциала, наводимого при протекании тока молнии в грунте, сопротивление растеканию тока в зоне расположения жилых и промышленных зданий и сооружений уменьшают с помощью металлической сетки достаточно большой площади, размещенной в грунте под фундаментом зданий. Однако сопротивление таких заземляющих систем все еще весьма далеко от нуля (рис. 2), и поэтому даже остаточные импульсные потенциалы, наведенные в заземляющей системе и проникающие по кабелям на входы электронной аппаратуры, представляют для нее серьезную опасность.

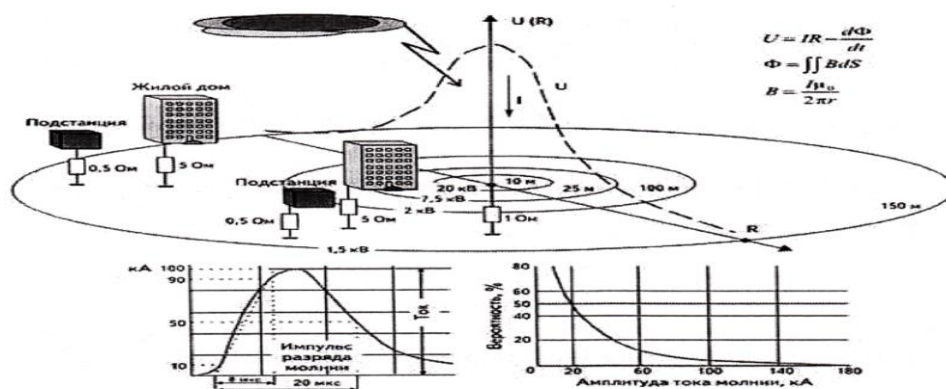


Рис. 2. Процессы, происходящие при попадании молнии в молниеотвод

Кроме помех такого вида, импульс сильного тока, проходящий по молниеотводу (кондуктивные помехи), создаёт и помехи в виде ЭМП, воздействующих на все близко расположенные проводники. Существуют еще и емкостные наводки, при которых короткие импульсы перенапряжения из высоковольтных ЛЭП попадают в низковольтные цепи через емкостные связи между обмотками трансформаторов.

В процессе распространения помехи имеет место многократное превращение одного её вида в другой, поэтому такое деление весьма условно, особенно когда речь идет о высокочастотных процессах. Импульс разрядного тока молнии с достаточно крутыми фронтами – 8 и 20 мкс (рис. 2) – можно рассматривать именно как такой высокочастотный процесс. Поэтому строгий анализ растекания тока в земле через заземляющие устройства требует учета обеих этих составляющих. Более того, попав в электронную аппаратуру посредством ЭМП или по проводам, помеха претерпевает многочисленные превращения уже внутри этой аппаратуры из-за наличия паразитных емкостных и индуктивных связей между отдельными элементами или между различными узлами аппаратуры. При этом высокочастотная составляющая помехи может проникать вглубь аппаратуры, в обход установленных фильтров и защитных элементов.

Еще один путь для проникновения помехи от разряда молнии – протекание токов по заземленному металлическому корпусу МУРЗ и заземленным экранам многочисленных кабелей, подключенных к нему. Все это говорит о том, что обеспечить должный уровень защиты электронной аппаратуры от ЭМП-помех очень непросто. Особенно сложно это сделать на ТПС, системы заземления которых проектировались для работы с электромеханической защитой, значительно более устойчивой к электромагнитным воздействиям, чем микропроцессорная. А если учесть, что опасные подъемы потенциала в цепях заземления возникают не только при ударах молнии, но и при аварийных К. З. в электрических сетях, то

проблема становится ещё более сложной. В некоторых случаях для предотвращения такого подъема потенциала в цепях электронной аппаратуры контуры заземления силового оборудования и электронной аппаратуры делают раздельными. Однако на существующих ТПС выполнить такое разделение нереально.

По нашему мнению, только комплексное решение проблемы позволит избежать влияния мощных ЭМП-помех на МУРЗ. Решение должно включать в себя:

а) использование МУРЗ на ТПС, спроектированных и построенных с учетом самых современных требований к ЭМС и рассчитанных на эксплуатацию высокочувствительной электронной аппаратуры;

б) совершенствование конструкции самих МУРЗ;

в) размещение МУРЗ в металлических шкафах, специально предназначенных для защиты электронного оборудования и снабженных фильтрами на всех кабелях, входящих в шкаф.

**Резонансные явления в тяговой сети.** При работе ЭПС с выпрямительными системами наблюдаются колебательные процессы в тяговой сети, при этом искажается форма кривой тока в тяговой сети и усиливаются высшие гармоники тока.

Известны два подхода к рассмотрению колебательных процессов. В первом исследуются собственные колебания в тяговой сети при работе ЭПС с выпрямительными системами в момент окончания коммутации. Во втором исследуется волновой колебательный процесс распространения тока по проводам тяговой сети, обусловленный ее распределенной емкостью [10].

## **Использование магнитолевитационных технологий при электродвижении**

Использование магнитолевитационных технологий при электродвижении существенно усложняет проблемы ЭМС в ЭЭЖС. Повышается как уровень магнитных и электрических связей между подсистемами и элементами ЭЭЖС, так и структура этих связей. Поэтому необходимо:

1. Переработать основные положения систем стандартизации и нормативно-технического обеспечения в ЭЭЖС, разработать и гармонизировать стандарты и другие нормативно-технические документы, обеспечивающие надёжность и безопасность электродвижения на электрифицированной железной дороге при использовании магнитной левитации.

2. Осуществить структурную перестройку устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) при управлении ЭПС.

3. Для дополнительной защиты СЦБ должно быть предусмотрено дублирование систем управления с использованием микропроцессорных устройств релейной защиты системами с электромеханическими реле, которые при всех своих недостатках в состоянии обеспечить надёжность управления ЭПС [6].

## Пути обеспечения ЭМС в ЭЭЖС

*Снижение уровня ЭМП помех от контактной сети.* Среди эффективных способов и средств защиты в контактных сетях от широкополосных высокочастотных полей помех следует **рекомендовать** [1]:

1. *Установить пассивные и активные электрические LC помехоподавляющие фильтры.* Наиболее эффективным средством снижения высокочастотных широкополосных помех на ТПС могут оказаться электрические LC -фильтры, которые желательно включать:

- в местах подключения ТПС на контактные сети (фильтр подключается к контактной сети в конце консоли и замыкается на рельс);
- на входе ТПС со стороны ЛЭП (фильтр подключается входом на входной провод тяговой подстанции, выходом на рельс).

2. *Произвести замену изоляторов и изменения в контактной сети.* Для снижения интенсивности поверхностного разряда в неблагоприятных климатических и геологических условиях необходимо увеличить длину пути тока утечки по поверхности изоляции. Для этого желательно существующие подвесные гирлянды, состоящие из четырех изоляторов ПС 70, заменить на гирлянды из четырех грязезащитных изоляторов ПСД 70-Е (с двойной юбкой). На питающей линии и линиях ДПР устанавливать по четыре изолятора ПСД 70-Е, в узлах анкеровок – по пять изоляторов ПСВ 120-Б. В качестве фиксаторных использовать стержневые изоляторы ФСФ 70-25/0,95. Существующие звеньевые струны с полимерными коушами рекомендуется заменять на сплошные токопроводящие струны из медного или бронзового канатика сечением  $16 \text{ мм}^2$ . Рекомендуется также на всех опорах анкерного участка заменить заземление на «глухое» к тяговому рельсу с учетом требований ПУТЭКС.

Искрение и электродуговые процессы при взаимодействии токоприемника с контактной подвеской в отдельных зонах возникают вследствие некачественной регулировки подвески в этих зонах. Поэтому контактную подвеску необходимо отрегулировать в соответствии с требованиями ПУТЭКС и типовых проектов.

3. *Осуществить демпфирование резонансных колебаний.* В качестве основного средства снижения амплитуды резонансных колебаний можно использовать контур из последовательно соединенных активного сопротивления  $R$  и емкости  $C$ , включаемой параллельно тяговой сети. Принципиально этот контур можно установить в любой точке сети, в частности на ЭПС (параллельно вторичной обмотке трансформатора) или на подстанции.

4. *Установить нелинейные ограничители мощных кратковременных импульсов напряжения.*

5. *Обеспечить электромагнитные развязки.* Наиболее эффективным средством снижения высокочастотных широкополосных помех могут оказаться так же, как и ранее,  $LC$ -фильтры, которые можно устанавливать по всей длине тягового провода. На каждые 10-15 км тягового провода фильтр подключается входом к проводу, выходом на рельс.

6. *Осуществить снижение автоколебаний контактного провода.* Наличие собственных колебаний съемного полоза ( $f = 1-2$  Гц) приводит к изменению искрового промежутка между ползком и тяговым проводом, что, в свою очередь, провоцирует электромагнитные колебания частотой  $f > 12$  МГц. Для исключения появления таких колебаний целесообразно заменить струнные подвесы, натяжку тягового провода и уменьшить пролет до 55 м (ранее принято 60-65 м).

Для уменьшения распространения колебаний компенсированной подвески вдоль анкерного участка и повышения её демпфирующих характеристик можно рекомендовать установку в опорных точках (наряду с рессорной струной) простых ограничительных струн. Кроме того, необходимо крепление к проводам аэродинамических стабилизаторов в виде узких пластин, изменяющих условия обтекания провода воздушным потоком и его аэродинамические характеристики.

***Снижение уровня ЭМП помех от ЛЭП.*** Для снижения поверхностной напряженности ЭП ЛЭП проектируют с расщепленными фазами и увеличивают диаметры проводов. Эти меры связаны с большими затратами. Поэтому ограничение поверхностной напряженности ЭП и, следовательно, уровня помех от линии обычно выполняется до некоторого предела, при котором радиопомехи от линии не превышают нормированного уровня. Необходимость дальнейшего снижения напряженности ЭП определяется экономическим расчетом, учитывающим потери энергии, возникающие при коронном разряде.

Необходима единая комплексная система подавления этих возмущений с применением гальванической и электромагнитной развязок; заземления; фильтрации (пассивных и активных помехоподавляющих фильтров); экранирования (пассивных и активных электромагнитных

экранов); нелинейных ограничителей мощных кратковременных импульсов напряжения; активных помехоподавляющих компенсаторов и блокировочных устройств.

Можно рекомендовать установку электрических *LC*-фильтров по всей длине ЛЭП. На каждые 10 км линии в населённой местности фильтр подключается входом к одной из фаз ЛЭП, выходом на систему заземления [1].

## Заключение

Предложен принцип формирования антиобледенительного покрытия для металлов и сплавов золь-гель методом за счет придания поверхности супергидрофобных свойств. Сформированное покрытие отличается особым иерархически организованным рельефом поверхности. Перспективными прекурсорами для получения супергидрофобных покрытий методами золь-гель технологии являются кремнийорганические бифункциональные мономеры с концевыми фторидными группами и гидрофобизированный наноразмерный кремнезем, обеспечивающий субмикронную шероховатость поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОХНМ РАН № 2 «Инновационные разработки металлических, керамических, стекло-, композиционных и полимерных материалов». Проект «Разработка новых наноструктурных композиционных материалов и функциональных покрытий для инновационного метода снижения потерь метана и увеличения ресурса работы эксплуатационного оборудования».

## Библиографический список

1. НТО. Методика расчета электромагнитных полей от железнодорожного транспорта, электрифицированного на постоянном токе. Комплексная реконструкция участка Мга - Гатчина – Ивангород и железнодорожных подходов к портам на Южном берегу Финского залива. – СПб.: МАНЭБ, 2005. – 147 с. (Работа выполнена по заказу ОАО «Ленгипротранс»).

2. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека. В 3-х т.: Т.2. Воздействие электромагнитной среды на технические устройства и средства защиты: Монография. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 439 с.

3. Kamra A. K. Inadvertent Modification of Atmospheric Electricity //Curr. sci. (India), 1991, v. 60, n. 11, pp. 639–646.

4. Gohberg M. V., Chirkov E. V. Electromagnetic prediction earthquakes. (Электромагнитные предвестники катастроф тектонического происхождения) //Геофизика и современный мир: Сб. докл. Междунар. науч. конф. 1993. – М., 1994. – С. 84.
5. Герман Л. А. Качество электрической энергии и его повышение в устройствах электроснабжения / Конспект лекций, ч. 2. – М., 2005.
6. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения. – М., 2014. – 256 с.
7. Власьевский С. В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока. – Хабаровск, 2001. – 138 С.
8. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 228 с.
9. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации. Дата введения: 13.04.2009. ОАО «ФСК ЕЭС».
10. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.
11. Крылов С. М., Никифорова Н. Н. О сверхнизкочастотном электромагнитном излучении активной геологической среды //Физика Земли – 1995 – № 6 – С. 42–57.
12. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. – М.: ИНТЕКСТ, 2004. – 272 с.

## References

1. NTO. *Metodika rascheta ehlektromagnitnyh polej ot zheleznodorozhnogo transporta, ehlektroficirovannogo na postoyannom toke. Kompleksnaya rekonstrukciya uchastka Mga - Gatchina – Ivangorod i zheleznodorozhnyh podhodov k portam na YUzhnom beregu Finskogo zaliva.* [STS. Method of calculation of electromagnetic fields from railway transport, electrified DC. Complete reconstruction of the Mga - Gatchina - Ivangorod and railway approaches to ports on the southern shore of the Gulf]. St. Petersburg, 2005. 147 p.
2. Apollonskiy S. M. *Ehlektromagnitnaya bezopasnost' tekhnicheskikh sredstv i cheloveka. T.2. Vozdejstvie ehlektromagnitnoj sredy na tekhnicheskie ustrojstva i sredstva zashchity: Monografiya* [Electromagnetic safety of technical facilities and human. In 3 t.: vol. 2. Exposure to electromagnetic environment on technical devices and remedies: Monograph]. St. Petersburg, 2011. 439 p.



3. Kamra K. *Curr. sci.* (India), 1991, vol. 60, no. 11, pp. 639-646.
4. Gohberg M. B., Chirkov E. B. Ehlektromagnitnye predvestniki katastrof tektonicheskogo proiskhozhdeniya [Electromagnetic prediction earthquakes]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Geofizika i sovremennyy mir"* (Sat. rep. Intern. scientific. Conf. "Geophysics and the Modern World"). 1994, pp. 84
5. Herman L. *Kachestvo ehlektricheskoy ehnergii i ego povyshenie v ustroystvah ehlektrosnabzheniya. Konspekt lekcij, ch. 2* [Quality of electric energy and its increase in power supply devices: Lectures, ch. 2]. Moscow, 2005.
6. Gurevich V. I. *Uyazvimosti mikroprocessornyh rele zashchity: problemy i resheniya* [Vulnerabilities microprocessor relay protection: problems and solutions]. Moscow, 2014. 256 p.
7. Vlasyevsky S. V. *Matematicheskoe modelirovanie processov kommutacii v vypriyatel'no-invertornyh preobrazovatelyah ehlektrovozov odnofazno-postoyannogo toka* [Mathematical modeling of switching in the rectifier-inverter electric single-phase inverters]. Khabarovsk, 2001. 138 p.
8. Demkin N. B. *Kontaktirovanie sherohovatyh poverhnostej* [Contacting rough surfaces]. Moscow, 1970. 228 p.
9. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya podstancij peremennogo toka s vysshim napryazheniem 35-750 kV (NTP PS). Standart organizacii* [Norms of technological design of substations with higher AC voltage of 35-750 kV (SS STP). Standard organization.] (Date of implementation: 13/04/2009).
10. Frayfeld V., Brod G. N. *Proektirovanie kontaktnoj seti* [Design of the contact network]. Moscow, 1991. 335 p.
11. Krylov S. M., Nikiforov N. *Fizika Zemli - Physics of the Earth*, no. 6, 1995, pp. 42-57.
12. Kosarev A. B. *Osnovy teorii ehlektromagnitnoj sovmestivosti sistem tyagovogo ehlektrosnabzheniya peremennogo toka* [Fundamentals of the theory of the electromagnetic compatibility of traction power supply AC]. Moscow, 2004. 272 p.

**Сведения об авторах:**

АПОЛЛОНСКИЙ Станислав Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ведущий специалист по ТПС ОАО «Ленгипротранс»  
E-mail: smapollon@yahoo.com

**Information about authors:**

APOLLONSKIY Stanislav, Dr. Sci. Sciences, Professor, Honored Worker of Science, a leading expert on traction substations of Open Joint Stock Company "LENGIPROTRANS"  
E-mail: smapollon@yahoo.com