

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 33:
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО,
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Наведено короткий аналітичний огляд основних науково-технічних досягнень в галузі електромагнітної сумісності технічних засобів, методів і пристроїв захисту радіоелектронного, електротехнічного і електроенергетичного обладнання від зовнішньої дії на нього потужних імпульсних електромагнітних завад, що містять високу напругу, великі струми і сильні електромагнітні поля. Бібл. 50, рис. 25.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, технічні засоби, потужна електромагнітна завада, захист технічних засобів від електромагнітних завад, заводозахисні пристрої, огляд.

Приведен краткий аналитический обзор основных научно-технических достижений в области электромагнитной совместимости технических средств, методов и устройств защиты радиоэлектронного, электротехнического и электроэнергетического оборудования от внешнего воздействия на него мощных импульсных электромагнитных помех, содержащих высокие напряжения, большие токи и сильные электромагнитные поля. Библ. 50, рис. 25.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, технические средства, мощная электромагнитная помеха, защита технических средств от электромагнитных помех, помехозащитные устройства, обзор.

Введение. Бесперебойная работа современного многообразного радиоэлектронного, электротехнического и электроэнергетического оборудования, обеспечивающего практическую реализацию важных для различных промышленных производств и технологий, стратегических военно-технических объектов и быта граждан любой страны мира электротехнологических процессов, напрямую связана с выполнением жестких требований по его *электромагнитной совместимости* (ЭМС) и защите от дестабилизирующего и поражающего действия внешних *мощных электромагнитных помех* (МЭМП) естественного и искусственного происхождения [1-3]. Следует напомнить читателю, что в настоящее время под ЭМС технических средств (ТС) понимается способность ТС функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке (ЭМО) и не создавать недопустимых по амплитудно-временным параметрам (АВП) электромагнитных помех другим ТС [3]. Укажем, что в области ЭМС под термином «*электромагнитная помеха*» понимается тот или иной электромагнитный процесс, который ухудшает или может ухудшить качество функционирования ТС, а также неблагоприятно повлиять на жизнедеятельность живого организма [3]. Что касается понятия ТС, то под ним в области ЭМС понимается оборудование, аппаратура, изделие и их составные части, функционирование которых основано на известных закономерностях в таких научно-технических дисциплинах как электротехника, радиотехника, электроэнергетика и электроника и которые в своем составе содержат различные электронные компоненты и схемы, выполняющие следующие функции: генерирование, преобразование, передача, прием, переключение и запоминание магнитных и электрических величин [3]. Следует отметить, что в области ЭМС под *помехоустойчивостью* ТС понимается способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних электромагнитных помех с регламентированными значениями АВП, заданными соответствующими нормативными документами [3]. Под элек-

тромагнитной стойкостью (*помехостойкостью*) ТС при решении прикладных задач в области ЭМС понимается способность ТС обеспечивать заданное качество функционирования и свою работоспособность только до определенных уровней АВП воздействующих на него МЭМП, указанных в соответствующих национальных (международных) стандартах и опубликованной научно-технической литературе [4-14]. Непрерывно расширяющиеся во всем мире масштабы применения в ТС высокочувствительных к влиянию МЭМП микропроцессорных устройств, предназначенных для управления, регистрации параметров, обмена информацией и автоматизации технологических процессов, объективно приводят к повышению актуальности проблемы ЭМС в современной технике [3].

1. Основные источники и виды МЭМП. Прежде всего, укажем, что по [5, 15, 17] под МЭМП понимаются такие электромагнитные помехи, воздействие которых на ТС вызывает при отсутствии в них помехозащитных средств, не относящихся к принципам действия и построения защищаемых ТС, нарушение их нормального функционирования, временный сбой в работе ТС (обратимый отказ) или выход их из строя (необратимый отказ). Источники возникновения МЭМП подразделяются на два основных класса: *первый класс* – источники естественного происхождения; *второй класс* – источники искусственного происхождения [5, 15]. Основными видами МЭМП, вызываемыми источниками естественного происхождения, являются [2, 3, 7, 10, 13-17]: *грозовые разряды (молнии)* в земной атмосфере, характеризующиеся в микросекундном временном диапазоне амплитудами протекающего тока в десятки (сотни) килоампер; *мощный электромагнитный импульс (ЭМИ)*, формируемый в атмосфере Земли сильноточным каналом молнии и изменяющийся в микросекундном временном диапазоне; *разряды статического электричества* при его потенциалах в десятки (сотни) киловольт, протекающие на начальной стадии в наносекундном временном диапазоне. К основным видам МЭМП, вызываемых источниками

© М.И. Баранов

искусственного происхождения, согласно [4-9, 11-15, 17-19] относятся: *коммутационные перенапряжения* амплитудой в десятки киловольт и *токи короткого замыкания (КЗ)* амплитудой в десятки килоампер, возникающие в миллисекундном временном диапазоне в электрических сетях промышленной частоты (50/60) Гц и в контактных сетях железнодорожного и городского электротранспорта; разрядные *большие импульсные токи* амплитудой в десятки (сотни) килоампер и *сильные электромагнитные поля* с напряженностью электрического до (10^2 - 10^4) кВ/м и магнитного до (0,3-30) кА/м полей, генерируемые в нано- и микросекундных временных диапазонах электроустановками высокого (сверхвысокого) напряжения, предназначенными для выполнения научных и электротехнологических целей; мощный ЭМИ, генерируемый в атмосфере Земли ядерным взрывом и изменяющийся в наносекундном временном диапазоне; мощный ЭМИ, генерируемый в сверхвысокочастотном диапазоне новым видом оружия – электромагнитным оружием, базирующимся на нетрадиционных физических принципах его построения и применения.

2. Основные методы защиты ТС от МЭМП.

Согласно [2, 15, 17, 18] основными методами защиты современных ТС от действия на них внешних МЭМП являются: во-первых, *конструкционный метод* и, во-вторых, *схемотехнический метод*. Подчеркнем то, что эти методы защиты ТС от МЭМП не затрагивают принципов функционирования и построения самих ТС. При их практическом использовании все средства защиты ТС от внешних электромагнитных помех находятся вне защищаемых электронных компонент и электрических схем ТС. Внутреннего «вмешательства» в защищаемые ТС при применении таких методов их защиты от действия внешних МЭМП не происходит. Наиболее распространенными приемами практической реализации конструкционного метода защиты ТС от МЭМП является применение *электромагнитных экранов*, расположенных вокруг защищаемых ТС, и *заземляющих устройств (ЗУ)*, отводящих возникающие помеховые электрические потенциалы и токи в землю [3-5, 7, 15]. Схемотехнический метод защиты ТС от МЭМП предполагает использование в зонах подхода опасных трактов к защищаемым ТС следующих электроустройств [1-7, 15, 18-21]: *защитных разрядников; ограничителей перенапряжений; варисторов; ограничительных диодов; комбинированных схем; защитных фильтров; устройств компенсации помех; устройств электромагнитной развязки цепей; резистивных схем*. Приведем далее технические особенности и возможности указанных методов и устройств защиты современных ТС от воздействия МЭМП.

3. Применение электромагнитных экранов для защиты ТС от МЭМП. Микроэлектронная и микропроцессорная техника, устройства связи, системы управления, обработки и передачи информации, а также устройства генерирования импульсов напряжений (токов) и электромагнитных полей (ЭМП) специальных форм и АВП и слаботочная низковольтная преобразовательная техника экранируются от действия внешних МЭМП при помощи металлических оболочек прямоугольной, цилиндрической, сферической

и иной геометрической формы [3-7]. Теория экранирования ТС от внешних постоянных электрических и магнитных полей, переменных и импульсных ЭМП в настоящее время для металлических оболочек разработана на высоком уровне [3, 21-23]. Основным параметром, характеризующим эффективность электромагнитного экранирования ТС при действии на них ЭМП, является экранное затухание A_e , определяемое в децибелах по следующему выражению [5, 15, 21]:

$$A_e = 20 \lg(E_0 / E_i) = 20 \lg(H_0 / H_i), \quad (1)$$

где E_0 , H_0 – соответственно напряженности электрического и магнитного полей, воздействующих снаружи на экран и защищаемые им ТС; E_i , H_i – соответственно напряженности электрического и магнитного полей, проникших сквозь стенку экрана в его внутреннюю область (зону экранирования от ЭМП) и действующих непосредственно на защищаемые ТС.

Как правило, значения напряженностей E_0 и H_0 , присутствующих в (1), заданы. Значения напряженностей E_i и H_i могут быть определены по расчетным соотношениям, приведенным, например, для квазистационарного режима проникновения низко- и высокочастотных ЭМП различной пространственной ориентации в не- и магнитные плоские, цилиндрические и сферические экраны в [3, 21-23]. Напомним, что квазистационарное приближение в теории экранов предусматривает при поиске решений уравнений Максвелла использование единственного ограничения, состоящего в том, что длина волны проникающего в экран ЭМП должна быть значительно больше основных геометрических размеров применяемого экрана. Из (1) следует, что при $E_0/E_i=H_0/H_i=10^3$ экранное затухание численно составляет 60 Дб. Такого затухания внешней МЭМП за счет применения металлического экрана соответствующих геометрических и электрофизических параметров вполне достаточно для надежного функционирования в штатном режиме практически любого защищаемого ТС из указанной нами выше техники. Для усиления экранного эффекта (повышения в (1) численных значений для соотношений E_0/E_i и H_0/H_i) при электромагнитном и магнитоэлектрическом экранировании защищаемых ТС в качестве дополнительных средств экранирования в зонах неоднородностей экранов (например, для крышек, лючков, вентиляционных отверстий и др.) применяются уплотняющие электропроводящие прокладки, волноводные электропроводящие насадки, сотовые электропроводящие решетки, тонкие электропроводящие сеточки и другие экранные элементы [4, 15, 24].

Отметим, что для создания экрана, ослабляющего приходящие извне полевые электромагнитные помехи, могут быть использованы металлоконструкции здания с защищаемыми ТС, включающие стальную арматуру его железобетонных элементов, проводники системы уравнивания потенциалов и заземлители [3]. На практике необходимо стремиться к созданию вокруг защищаемых ТС экрана с максимальным значением по (1) экранного затухания A_e . С этой целью все металлоконструкции инженерных коммуникаций (например, трубопроводы, вентиляционные короба, оболочки кабельно-проводниковой продукции и др.), входящих в здание с защищаемыми ТС, арматура,

металлические коробки дверей и окон строительной части этого здания должны быть многократно гальванически (электрически) соединены друг с другом, металлическим экраном и с контуром заземления [3].

4. Применение заземляющих устройств для защиты ТС от МЭМП. Использование ЗУ является одним из наиболее распространенных приемов по защите ТС от влияния на их работу помеховых (индуктированных) напряжений и токов, вызванных воздействием на них внешних МЭМП, и обеспечению безопасных условий обслуживания ТС [3, 15, 25]. Поэтому в современных условиях ЗУ рассматриваемых нами ТС, особенно для объектов электроэнергетики, должны отвечать действующим требованиям как в области ЭМС, так и электробезопасности людей [26]. Данные требования направлены на выполнение прикладных задач защиты ТС и их обслуживающего персонала от МЭМП, преимущественно возникающих, в частности, на энергообъектах при коммутациях в электрических сетях промышленной частоты (50/60) Гц и воздействии импульсных токов молнии [27]. Обычно ЗУ содержит заземляющий токопровод, жестко соединенный с заземляемой частью ТС (например, с металлическим корпусом-экраном ТС) и заземлителем, выполненным из заглубленной металлоконструкции, находящейся в соприкосновении с землей. Составные части ЗУ предназначены для отвода в землю индуктированных внешней электромагнитной помехой в металлическом корпусе-экране ТС зарядов и потенциалов, снижения напряжения прикосновения к металлическому корпусу-экрану ТС и шагового напряжения вблизи защищаемого ТС (например, шкафа управления на территории такого электроэнергетического объекта как подстанция) до безопасных уровней [3, 15, 25-27]. В настоящее время ЗУ для электроэнергетических объектов (ЭЭО) во многих странах мира нормируются, в основном, по значениям сопротивления заземления (от долей до десятков Ом), потенциала на ЗУ (от сотен вольт до десятков кВ) и напряжения прикосновения (от десятков до сотен вольт) [27, 28]. Численные значения данных нормируемых параметров существенно зависят от конструкционного исполнения ЗУ, электрофизических параметров грунта, в котором находится заземлитель ЗУ, и электрических параметров защищаемого объекта (например, для энергообъекта к таким параметрам относится допустимое значение тока КЗ, время срабатывания релейной защиты, класс напряжения и др.) [28-30]. Многолетняя практика эксплуатации различного электротехнического и электроэнергетического оборудования в составе промышленных энергосистем показывает, что от качества и характера исполнения на нем ЗУ существенно зависит ЭМО и соблюдение для него требований ЭМС [3]. В качестве полезной технической информации по ЗУ в электроэнергетике укажем, что в [31] была представлена прошедшая длительную практическую апробацию на энергообъектах Украины методика проведения электромагнитной диагностики (ЭМД) состояния их ЗУ. При выполнении ЭМД ЗУ на работающем и находящемся под напряжением электроэнергетическом оборудовании контроль конструкционного исполнения ЗУ осуществляется, как правило, индукционным методом [26, 31].

Согласно [3, 15, 27] при решении задач электробезопасности персонала и ЭМС для ТС используются три вида заземлений: первый вид – *заземление молниезащиты*, предназначенное для отведения в землю импульсного тока молнии, обычно характеризующегося для его импульсной компоненты длительностью до 500 мкс нормируемой амплитудой до 200 кА и длительной компоненты продолжительностью до 1000 мс с усредненной амплитудой до 200 А [8, 13, 14]; второй вид – *защитное заземление*, используемое для обеспечения безопасности обслуживающего ТС персонала путем гальванического подключения металлических частей электрооборудования, которые в нормальных условиях работы имеют практически нулевой потенциал, а в аварийном режиме работы могут оказаться под напряжением, к контуру заземления; третий вид – *рабочее заземление*, предназначенное для создания опорного эквипотенциального уровня в электрических схемах и системах ТС, обеспечивающего требуемые условия для нормального режима их функционирования. На практике при обеспечении эффективной защиты ЭЭО от поражающего действия внешних МЭМП применяется концепция зонной защиты их ТС и соответственно комплексный подход в использовании ЗУ, предусматривающий установку в различных зонах защищаемого ЭЭО и ТС одновременно трех указанных видов заземлений [3, 15, 26, 27].

5. АВП основных перенапряжений при защите ТС от МЭМП. Согласно [3, 18] и требованиям ГОСТ Р 54149-2010 [32] по качеству электроэнергии в опасных трактах воздушных (кабельных) линий электропередачи, линий связи и управления, «подходящих» к ТС ЭЭО, от грозовых разрядов и коммутаций в электросетях могут возникать импульсные грозовые с амплитудой U_m до 10 кВ на входе в здание с защищаемыми ТС (причем, с амплитудой U_m до 6 кВ во внутренней проводке здания с ТС) и коммутационные с амплитудой U_m до 4,5 кВ перенапряжения (рис. 1).

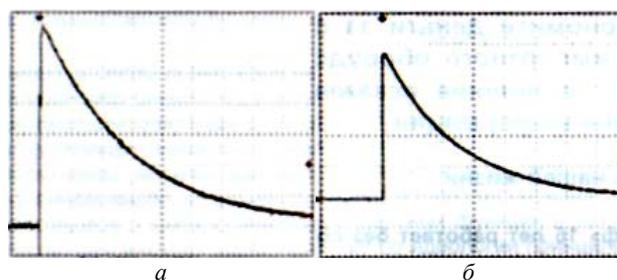


Рис. 1. Грозовые (а) и коммутационные (б) перенапряжения аperiodической формы на входе в здание, воздействующие на защищаемые в нем ТС (для а – 1/50 мкс; $U_m=10$ кВ; масштаб по горизонтали – 25 мкс/клетка; для б – 250/5000 мкс; $U_m=4,5$ кВ; масштаб по горизонтали – 2500 мкс/клетка) [18]

Возможны «провалы» и «всплески» напряжения сети. Эти «провалы» и «всплески» напряжения в сети электропитания ТС могут быть вызваны аварийными ситуациями (обрыв нейтрали, когда вместо напряжения 220 В может появляться напряжение вплоть до 380 В) и перегрузками в сети электроснабжения, обусловленными подключением (особенно в зимний период) большого числа электронагревательных приборов. В последнем случае напряжение в сети электропитания

ТС вместо требуемых 220 В может длительно находиться в диапазоне (160-180) В [18]. На рис. 2 приведены возможные перенапряжения от «провалов» и «всплесков» в электросети питающего напряжения.

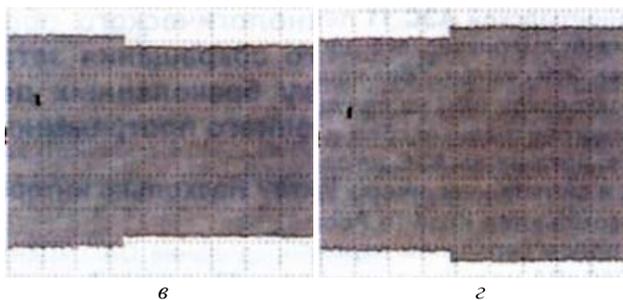


Рис. 2. Перенапряжения в сети электропитания защищаемых ТС, вызванные «провалом» (в) и «всплеском» (з) на 10 % питающего сетевого электрического напряжения [18]

Кроме того, в опасных трактах вышеуказанных линий, «подходящих» к техническому зданию с защищаемыми ТС, из-за воздействия на них коммутационных затухающих синусоидальных токов и ЭМИ упомянутой электромагнитной природы могут возникать высокочастотные перенапряжения типа «звонящая волна» частотой до 0,1 МГц при амплитуде U_m до 4 кВ или частотой 1 МГц при U_m до 2 кВ (рис. 3) [18].

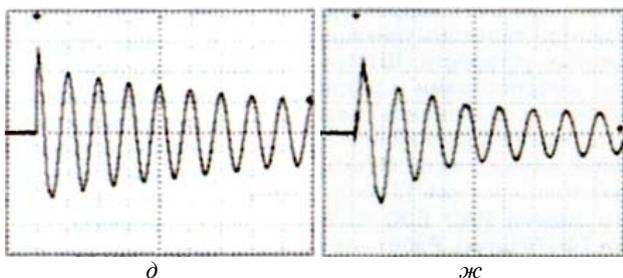


Рис. 3. Перенапряжения типа «звонящая волна» частотой до 0,1 МГц с амплитудой U_m до 4 кВ (д, масштаб по горизонтали – 10 мкс/клетка) и частотой 1 МГц с амплитудой U_m до 2 кВ (ж, масштаб по горизонтали – 1 мкс/клетка) в опасных трактах линий на входе в здание с защищаемыми ТС [18]

При выборе устройств защиты от помех для ТС необходимо не забывать и о возможных перенапряжениях в сети электроснабжения, обусловленных кратковременными «всплесками» питающего ТС напряжения от 220 до 380 В (рис. 4,з), а также о наносекундных импульсных помеховых напряжениях аperiодической временной формой 5/50 нс с амплитудой U_m до 2,5 кВ (рис. 4,и), «приходящих» по опасным трактам рассматриваемых нами линий ко входу здания с защищаемыми ТС [18]. Используя приведенные выше данные для АВП основных перенапряжений, возникающих в «подходящих» к зданию с ТС трактах, рассмотрим далее возможные пути их ограничения.

Укажем и то, что в 2012 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был создан генератор стандартных аperiодических коммутационных импульсов напряжения положительной (отрицательной) полярности временной формой 205/1900 мкс с амплитудой до 2000 кВ, удовлетворяющий действующим на сегодня межгосударственным требованиям [9] и предназначенный для проведения в полевых условиях натурных испытаний объектов электроэнергетики на электрическую прочность их наружной (внутренней) изоляции [33].

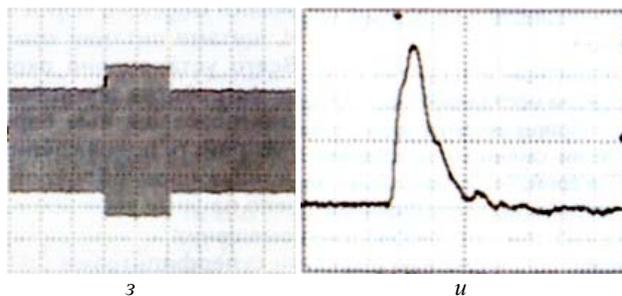


Рис. 4. Перенапряжение в сети электропитания защищаемых и находящихся внутри здания ТС, обусловленное кратковременным «всплеском» питающего сетевого напряжения с 220 до 380 В (з), и перенапряжение в опасном тракте «подходящей» ко входу здания с ТС линии, вызванное наносекундной импульсной помехой временной формой 5/50 нс (и, $U_m=2,5$ кВ; масштаб по горизонтали – 50 нс/клетка) [18]

6. Некоторые особенности защиты слабо- и силовоточного электрооборудования от МЭМП. Отключение перенапряжений (токов) КЗ и коммутационных перенапряжений (токов) в промышленной сети электропитания слабо- и силовоточных ТС или воздействующих на них импульсных токов (перенапряжений) молнии электромеханическими выключателями (ЭМВ), наверное, было бы наиболее простой и надежной защитой ТС от действия на них перенапряжений от данных МЭМП. Однако работа особенно слаботочных электронных схем и соответствующего радиоэлектронного и иного электрооборудования при указанных внешних МЭМП и временах срабатывания ЭМВ в сотни миллисекунд является категорически невозможной. Для реализации защиты подобных ТС применения лишь ЭМВ не достаточно. В этом случае для защиты слабо- и силовоточных цепей ТС от опасных для них быстротекущих переходных электромагнитных процессов, вызванных нештатными ситуациями (например, КЗ, коммутациями, ударом молнии и другими факторами), в «подходящих» к ним сетях энергообеспечения, кабелях связи и обусловленных ими перенапряжений необходимы такие помехозащитные устройства (ПЗУ), которые способны отключать (ограничивать до безопасных уровней) указанные перенапряжения (токи) за десятки (сотни) наносекунд. Постараемся ниже рассмотреть основные ПЗУ, пригодные для защиты слабо- и силовоточных цепей ТС от действия на них перенапряжений, обусловленных внешними МЭМП различной природы.

7. Применение разрядников для защиты ТС от МЭМП. Большинство современных ПЗУ на первой (грубой) ступени ограничения воздействующего на защищаемые ТС импульсного перенапряжения содержат высоковольтные двухэлектродные газонаполненные (реже воздушные) разрядники [3, 15, 18, 34, 35]. Газонаполненные разрядники (рис. 5) устанавливаются вблизи мест ввода шин электропитания, выравнивания потенциалов и заземления в защищаемые объекты с ТС. Их задача – обеспечить защиту ТС от действия возможных перенапряжений путем их снижения до малого уровня. Напряжение их срабатывания из-за зависящей от времени характеристики зажигания таких разрядников определить трудно. Они имеют герметичные стеклянные (керамические) корпуса, заполненные благородным газом (аргоном или неоном) [3, 35]. Металлические электроды в их раз-

рядном промежутке покрыты специальным тонким активирующим слоем. Они способны коммутировать импульсы тока временной формой 8/20 мкс с амплитудой до 40 кА. Для гарантирования малого разброса разрядного постоянного напряжения эти разрядники имеют внутри слабое радиоактивное покрытие [3, 35].

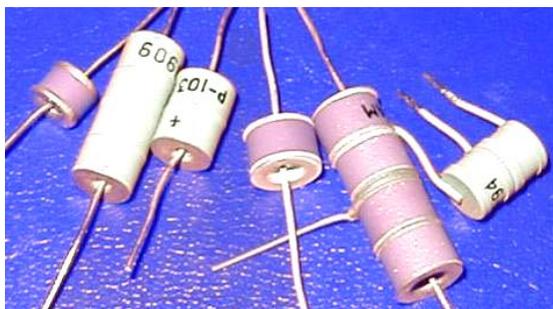


Рис. 5. Внешний вид маломощных газонаполненных разрядников (типа P-103 и др.), способных «пропускать» импульсные токи формой 8/20 мкс с амплитудой до 10 кА [35]

После зажигания газонаполненных разрядников напряжение между их электродами падает сначала до напряжения тлеющего разряда (до 100 В), а затем при возрастании коммутируемого тока – до напряжения горения электрической дуги (примерно до (10-20) В) [3]. Этот тип разрядников срабатывает в микросекундной области (время срабатывания для их лучших конструкций составляет до единиц микросекунд). В цепях переменного напряжения они дугу с сопровождающим током самостоятельно гасить не в состоянии. В низковольтных сетях постоянного тока дугу подобные газовые разрядники гасят самостоятельно [35].

На рис. 6 приведен общий вид газонаполненных разрядников типа GDT, способных рассеивать сравнительно большую тепловую энергию, «вносимую» в цепи МЭМП. Газонаполненные разрядники GDT находят применение в телекоммуникационной аппаратуре, телефонии и радиопередающем оборудовании.



Рис. 6. Внешний вид газонаполненных разрядников типа GDT, используемых в телемеханике и радиотехнике [35]

Следует подчеркнуть то, что собственная электрическая емкость указанных газонаполненных разрядников крайне мала. Поэтому они не могут вносить существенных искажений в полезный электросигнал [35]. На рис. 7 приведен общий вид мощных грозозащитных разрядников (РФ), способных защитить дорогостоящую радиотехническую аппаратуру от прямого воздействия грозовых сильнотоковых разрядов [36].

Приведенные на рис. 7 грозозащитные разрядники способны «пропускать» через себя и затем направлять в заземлитель стандартные аperiodические импульсы тока 10/350 мкс молнии амплитудой до (50-100) кА [36]. Основной задачей этих разрядников при защите ТС от МЭМП является ограничение грозового

перенапряжения до предписанного им остаточного уровня (от 1 до 2,5 кВ) [35, 36]. На рис. 8 показан общий вид зарубежных грозозащитных разрядников с одними из лучших технических характеристик [35].



Рис. 7. Внешний вид мощных грозозащитных герметичных разрядников, применяемых при защите радиотехнической аппаратуры от перенапряжений, вызванных прямым ударом в нее молнии (слева-направо: типа P-77-1В и типа P-59) [36]



Рис. 8. Внешний вид мощных грозозащитных разрядников типа COMBTEC VV 335 и COMBTEC VS 335, коммутирующих импульсные токи 10/350 мкс молнии амплитудой до 40 кА и ограничивающих грозовые перенапряжения для электротехнического оборудования до уровня 1 кВ [35]

На рис. 9 представлена «линейка» разрядников грозозащитных низковольтных (РГЗН) разработки ЗАО «ЭМСОТЕХ» (РФ) [18, 37], предназначенных для защиты низковольтных вводов (220/380 В) в здания, низковольтных обмоток трансформаторов, автономных источников электроэнергии (например, дизель-генераторов) и изоляции кабелей от воздействия на них грозовых и коммутационных перенапряжений. Данные РГЗН могут надежно коммутировать импульсы тока молнии стандартной временной формой 10/350 мкс с амплитудой I_m от 25 до 100 кА [18, 37].



Рис. 9. Внешний вид мощных грозозащитных разрядников низковольтного типа РГЗН (слева-направо: РГЗН-3/100-220 на $I_m=100$ кА; РГЗН-3/50-220 на $I_m=50$ кА; РГЗН-3/25-220 на $I_m=25$ кА; фирма «ЭМСОТЕХ», г. Калуга, РФ) [18, 37]

На основе указанных разрядников РГЗН-3/100-220 (см. рис. 9) специалистами российского ЗАО «ЭМСОТЕХ» были созданы панели грозозащитные

низковольтные типа ПГЗН (рис. 10), которые в 2010 г. нашли свою практическую реализацию в новой системе молниезащиты современного радиооптического комплекса РФ по распознаванию космических объектов, внешний вид которого приведен на рис. 11 [18].

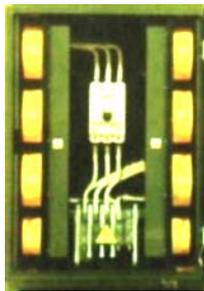


Рис. 10. Общий вид панели грозозащитной низковольтной с резервированием типа ПГЗН-Р-3/100-220 ($I_m=100$ кА; тип разрядника – РГЗН-3/100-220; импульсное напряжение пробоя каждого из восьми разрядников – 4 кВ; РФ) [18, 37]



Рис. 11. Внешний вид уникального радиооптического комплекса распознавания космических объектов (РФ), оснащенного рядом грозозащитных панелей типа ПГЗН-Р для защиты от прямых ударов в его элементы молнии [18, 37]

8. Применение ограничителей перенапряжений для защиты ТС от МЭМП. В настоящее время ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) являются одними из наиболее эффективных средств защиты различных ТС от МЭМП [38]. ОПН (рис. 12) представляет собой высоковольтный электрический аппарат, предназначенный для защиты электросетей среднего и высокого классов напряжения переменного тока промышленной частоты и соответственно рассматриваемого нами электрооборудования от коммутационных и атмосферных (грозовых) перенапряжений. Данный аппарат можно назвать «разрядником без искровых промежутков» [38]. В отличие от традиционных вентильных разрядников с искровыми промежутками и карборундовыми резисторами ОПН не содержат искровых промежутков и состоят только из колонки нелинейных резисторов («таблеток»), выполненных на основе окиси цинка и заключенных в полимерную или фарфоровую покрывку. Конструктивное исполнение ОПН допускает их изготовление в виде одноколонковых и многоколонковых аппаратов.



Рис. 12. Общий вид широко используемых в промышленной электроэнергетике одноколонковых ОПН с полимерными покрывками, обеспечивающими надежную защиту их нелинейных резисторов от атмосферных воздействий [38]

Основным элементом нелинейных резисторов в ОПН является *варистор*, выполняемый, как правило, в виде «таблетки» из оксида цинка (ZnO) с наружной оболочкой из глифталевой эмали, повышающей его пропускную способность по току [38]. Материал варистора на основе указанного оксида, смешиваемого с оксидами других металлов, представляет собой последовательно-параллельно включенных *p-n* переходов [38]. Этот материал, по сравнению с материалом резисторов в вентильных разрядниках, обладает повышенной пропускной способностью и высоконелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Именно благодаря такой ВАХ варисторы и, соответственно, ОПН могут длительно находиться под напряжением, при котором обеспечивается высокий уровень защиты силового электрооборудования [38].

В нормальном рабочем режиме ток через ОПН имеет емкостный характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении МЭМП и соответственно воздействию перенапряжений на нелинейные резисторы ОПН их рабочий материал переходит в проводящее состояние с малым сопротивлением и тем самым ограничивает дальнейшее нарастание перенапряжения до уровня, безопасного для изоляции защищаемой электроустановки и иных ТС [38]. При этом через ОПН могут «проходить» импульсные токи с амплитудами в десятки килоампер. При исчезновении перенапряжения ОПН возвращается в исходное непроводящее состояние. Величины рабочих напряжений для ОПН изменяются в широких пределах – от 3 до 750 кВ [38-40]. Основными местами установки высоковольтных ОПН являются открытые (закрытые) распределительные устройства на энергообъектах и подходы к зданиям с ТС. Известными в мире фирмами-производителями таких ОПН являются [38, 39]: «Dervasil» (Группа SICAME, Франция); «Siemens» (Германия); «ABB» (Швейцария); «СЕВЗАППРОМ» (РФ). В Украине передовые позиции в технологии изготовления ОПН на напряжения класса 3-150 кВ для потребностей электроэнергетики занимала фирма ES «Полимер» (г. Артемовск, Донецкой обл.) [40].

На рис. 13 приведен общий вид одно- и многофазных ОПН, предназначенных для защиты потребителей электроэнергии, запитываемых от электрических сетей с частотой (50/60) Гц, от скачков напряжения, коммутационных перенапряжений, дифференциальных перенапряжений и высокочастотных помех [41]. ОПН в этом случае устанавливается между фазой и землей или нулевым проводом и землей. При этом в обязательном порядке требуется наличие заземляющего провода для последующего «сброса» импульсной тепловой энергии от МЭМП в заземлитель.

На актуальность, важность и остроту необходимость более широкого применения ОПН в промышленной электроэнергетике, высоковольтной (низковольтной) электротехнике, телемеханике и радиоэлектронике указывает то, что по данным американской фирмы «General Semiconductor» финансовые потери в промышленности США на сегодня только от поражающего действия на ее развитую инфраструктуру перенапряжений (токов) от рассматриваемых МЭМП составляют до 10 млрд. долларов USA в год [42].



Рис. 13. Общий вид одно- (слева) и трехфазных (справа) ОПН, применяемых в электросетях переменного напряжения (тока) промышленной частоты (50/60) Гц во вводно-распределительных устройствах, главных распределительных щитах технооборудований и квартирных щитах жилых зданий (производитель – фирма «Schneider», Германия) [41]

9. Применение варисторов для защиты ТС от МЭМП. Как нам известно, *варистор* является полупроводниковым резистором, сопротивление которого изменяется нелинейно под действием приложенного к нему электрического напряжения [38, 43]. Раньше в электротехнике и радиоэлектронике применялись варисторы, изготовленные на основе карбида кремния. В настоящее время обычно используются оксидно-цинковые варисторы на различные значения рассеиваемой мощности [3, 38]. Варистор имеет симметричную нелинейную ВАХ. С увеличением воздействующего напряжения его активное сопротивление резко падает. Поэтому при импульсном воздействии напряжения на варистор возникающий на нем электропотенциал может быть ограничен. Это физическое свойство варисторов и используется при их применении во внешних по отношению к защищаемым ТС электрических цепях (рис. 14) в качестве защитного устройства для ограничения перенапряжения от МЭМП. Варисторы реагируют на появление на них импульсного напряжения за наносекунды. Поэтому они имеют короткое время срабатывания – (20-50) нс. В то время как газонаполненные разрядники срабатывают в микросекундном временном диапазоне (≥ 1 мкс) [3, 18, 44].

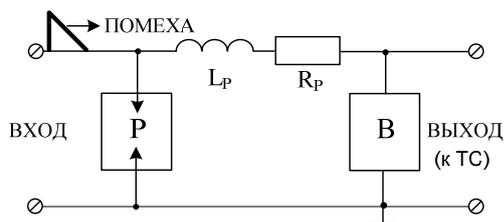


Рис. 14. Схема ПЗУ с двумя ограничителями перенапряжения от помехи – разрядником и варистором (P – высоковольтный разрядник; B – высоковольтный варистор; R_p, L_p – активное сопротивление и индуктивность развязывающего элемента в двухпроводной электрической цепи ПЗУ) [3]

На рис. 15 приведены совмещенные осциллограммы помехового тока i и напряжения u на мощном варисторе типа Protес BR 150/320 (производитель – фирма «Искра-Защита»; Словения), испытываемом воздействию «набегающего» на него стандартного импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии [3, 13].

Для удобства обработки экспериментальных данных на рис. 15 осциллограмма напряжения u по-

мехи на указанном варисторе была смещена вправо на одну клетку относительно осциллограммы протекающего через него помехового тока i . Из данных рис. 15 видно, что помеховый ток i на варисторе имеет практически линейный спад при его амплитуде около 21 кА [3]. Напряжение u на исследуемом варисторе через 400 мкс после его помеховой амплитуды примерно в 4 кВ и соответственно начала импульса перенапряжения (тока) принимало значение около 1 кВ. Во время действия помехового импульса тока i имитированной молнии напряжение u на варисторе должно было оставаться почти неизменным. Однако, определенные искажения в форму импульса напряжения u помехи на рис. 15 «внесли» провода подсоединения нашего варистора к потенциальному и заземленному токопроводам испытываемой защитной схемы. В этой связи эти провода подсоединения на практике должны выполняться предельно короткими по длине [3]. Одним недостатком варисторов, используемых в сетях электроснабжения с напряжением 220/380 В для защиты ТС от перенапряжений, является относительно высокое остаточное напряжение их ограничения (от 1 до 2,5 кВ). В этой связи при их применении требуется вторая ступень ограничения перенапряжения [3, 38].

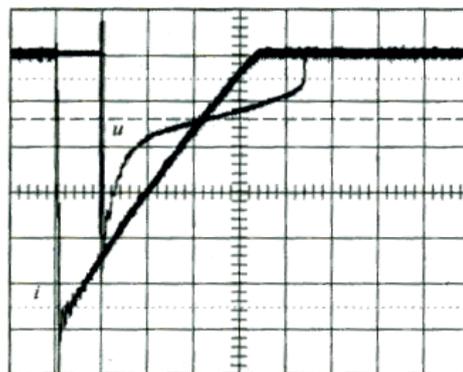


Рис. 15. Совмещенные осциллограммы помехового грозового тока i аperiodической временной формой 10/350 мкс, воздействующего на варистор, и напряжения u помехи на варисторе (масштаб по вертикали для тока – 3,7 кА/клетка; масштаб по вертикали для напряжения – 800 В/клетка; масштаб по горизонтали для времени – 200 мкс/клетка) [3]

В приведенной на рис. 14 защитной схеме необходимо осуществлять координацию параметров разрядника P и варистора B . Такая координация может выполняться за счет применения элементов их развязки, в качестве которых могут использоваться резисторы и индуктивности. Применение катушек индуктивности для развязки разрядников и варисторов весьма ограничено [3]. Как правило, в качестве таких элементов развязки используются провода сети электроснабжения ТС. Согласно данным из [3] между грозозащитным разрядником P и мощным высоковольтным варистором B длина проводов сети электропитания, подводимых к ТС, должна составлять около 10 м. При этом длина проводов этой сети между варистором B и защищаемым ТС должна составлять не менее 5 м [3].

Одним из преимуществ варисторов перед газонаполненными разрядниками является то, что они при срабатывании не закорачивают электрическую цепь. Поэтому варисторы как элементы ПЗУ используются в цепях электропитания многих ТС. Сравнительно большая электрическая емкость варисторов ограничивает их применение в высокочастотных электриче-

ских цепях (в этом случае из-за таких величин их паразитной емкости может происходить дополнительное искажение и затухание полезного сигнала) [3, 38].

10. Применение ограничительных диодов для защиты ТС от МЭМП. Наиболее чувствительными к воздействию импульсных напряжений (токов), наведенных ЭМИ естественного (искусственного) происхождения, а также вызываемых коммутационными и атмосферными (грозовыми) процессами на «подходящих» к зданию с защищаемыми ТС проводах и кабелях, являются подключенные к ним устройства с интегральными микросхемами (ИМС) и полупроводниковыми приборами. Известно, что минимальная энергия, вызывающая невосстанавливаемые повреждения чувствительных к действию МЭМП полупроводниковых приборов и ИМС, составляет от 10^{-2} до 10^{-7} Дж [7, 42]. Кроме газонаполненных разрядников и металлооксидных варисторов одними из основных защитных элементов являются также TVS (Transient Voltage Suppressor)-диоды [3, 42]. В отечественной литературе их еще называют «супрессорами» или «диодами для подавления переходных процессов». TVS-диоды часто путают с кремниевыми стабилитронами (диодами Зенера) [42]. Заметим, что TVS-диоды были специально разработаны впервые в США для защиты радиоэлектронной аппаратуры различных ТС от воздействия на нее мощных импульсов перенапряжения. Кремниевые стабилитроны предназначены для регулирования напряжения и не рассчитаны на работу в схемах при значительных импульсных электрических нагрузках. За рубежом TVS-диоды известны под следующими названиями: Transil, Insel, Transorb и др. Укажем, что время срабатывания для несимметричных TVS-диодов составляет порядка 10^{-12} с, а для симметричных – около $5 \cdot 10^{-9}$ с [42]. Импульсные токи ограничения для них составляют от единиц до сотен ампер, а напряжения ограничения – от единиц до сотен вольт [3, 42]. Не менее важной характеристикой для этих диодов является барьерная емкость их $p-n$ перехода, составляющая до 100 пФ [42]. Это позволяет использовать TVS-диоды для защиты линий связи с частотой тока до 100 МГц от выбросов напряжения, а также многих радиочастотных цепей, в состав которых входят чувствительные к переходным электромагнитным процессам полупроводниковые приборы и ИМС. Принцип работы TVS-диода, обладающего резко выраженной нелинейной ВАХ, поясняет нам рис. 16. В нормальном режиме защищаемой схемы (электрической нагрузки) TVS-диод «невидим» и он не влияет на ее работу. При возникновении импульса перенапряжения на TVS-диоде, амплитуда которого превышает напряжение его лавинного пробоя, он «открывается» и «пропускает» через себя на землю опасный для защищаемого ТС электроток. При этом он одновременно осуществляет и ограничение «пришедшего» выброса напряжения до безопасного уровня [3].

Принципиальной отличительной особенностью TVS-диодов от газонаполненных разрядников является то, что у них напряжение пробоя ниже напряжения ограничения. Для разрядников же напряжение электрического пробоя их изоляционных промежутков существенно выше напряжения поддержания разряда. Поэтому при использовании TVS-диодов защищаемые ими цепи не шунтируются после прохождения через их $p-n$ переходы импульса тока мощной помехи.

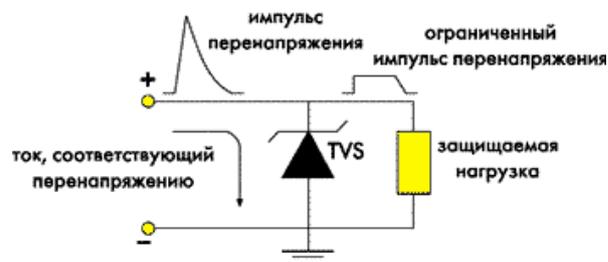


Рис. 16. Простейшая принципиальная электрическая схема, поясняющая физический принцип работы TVS-диода [42]

11. Применение комбинированных ПЗУ для защиты ТС от МЭМП. На практике при защите многих ТС от поражающего действия на них МЭМП нашли применение многоступенчатые ограничители перенапряжений, использующие одновременно в одном ПЗУ описанные нами выше газонаполненные разрядники, металлооксидные варисторы и TVS-диоды. В таких защитных схемах используются высокие технические характеристики одних элементов и снижаются влияния недостатков других элементов на процесс функционирования подобных схем. На рис. 17 приведена схема трехступенчатой защиты ТС от перенапряжений с развязывающими элементами [3, 7].

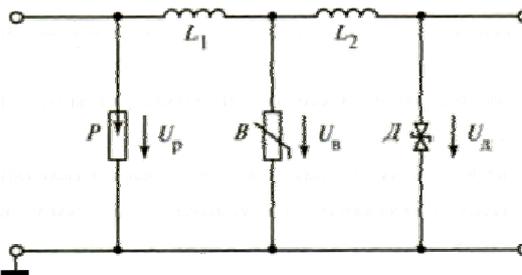


Рис. 17. Принципиальная электрическая схема комбинированной защиты ТС с полупроводниковыми приборами и ИМС от помеховых перенапряжений и токовых перегрузок (P – газонаполненный разрядник; B – металлооксидный варистор; D – встречно включенные ограничительные TVS-диоды; L_1, L_2 – развязывающие индуктивности) [3, 7, 15]

При появлении на входе схемы защиты согласно рис. 17 импульса перенапряжения или кондуктивной помехи первыми срабатывают TVS-диоды (*тонкая защита*), обеспечивающие высокое быстродействие ПЗУ (до единиц наносекунд) [3, 42]. Данные диоды способны пропускать импульсные токи помехи формой 8/20 мкс с амплитудой до 0,6 кА при напряжении своего лавинного пробоя до 6 В [3, 42]. При этом часть тока МЭМП отводится в землю, а на входе защищаемого ТС напряжение U_D ограничивается в соответствии с ВАХ используемого TVS-диода (примерно до 10 В). Далее возрастающее напряжение на развязывающем элементе L_2 приводит к срабатыванию варистора B , отводящего тоже часть тока помехи на землю и ограничивающего помеховое напряжение U_B до уровня около 100 В [3]. Затем увеличение напряжения на развязывающих индуктивностях L_1 и L_2 вызывает срабатывание разрядника P (*грубая защита*), дополнительно отводящего в землю ток помехи. Из-за выделения тепловой энергии на разряднике P и малого значения остающегося на нем напряжения (до 20 В) облегчается работа варистора B . В тоже время варистор B в определенной мере защищает разрядник P от электротеплового действия на его рабочие элементы тока МЭМП и

возможного разрушения. Напряжение ограничения U_p на разряднике P составляет порядка 1 кВ. Таким образом, в комбинированном ПЗУ (см. рис. 17) может реализовываться существенное снижение перенапряжения, вызванного внешней МЭМП. В свое время этот вывод был автором подтвержден экспериментально [45]: применение рассматриваемой трехступенчатой схемы защиты ТС от МЭМП грозового происхождения позволило на основе использования TVS-диодов типа 1,5KE6,8A ($U_D \approx 6,8$ В), металлооксидного варистора типа FNR07K820 ($U_B \approx 135$ В) и газонаполненного искрового разрядника типа LSA140 ($U_p \approx 1,1$ кВ) надежно защитить от прямых (косвенных) ударов молнии интерфейсную линию связи RS-485, предназначенную для обеспечения информационного взаимодействия в условиях сложной ЭМО электронно-вычислительных средств радиотехнического комплекса, разработанного и созданного в Украине.

12. Применение фильтров для защиты ТС от МЭМП. В области ЭМС и защите ТС от помех большинство задач возникает от проникновения МЭМП в защищаемое электрооборудование через цепи связи, управления и электропитания. Поэтому защите сетей электропитания ТС в мире уделяется большое внимание. На рис. 18 показан общий вид немецкого сетевого фильтра (СФ) типа FMW2-41-B/1, предназначенного для защиты промышленных цепей электропитания на производстве и в быту от импульсных МЭМП [46]. Принципиальная электрическая схема этого СФ приведена сверху на его металлическом корпусе-экране. Согласно данным рис. 18 электрические параметры этого СФ составляют: входная емкость – 15 нФ; индуктивности – 0,8 мГн; выходные емкости – 2,2 нФ.



Рис. 18. Внешний вид сетевого фильтра для защиты от импульсных МЭМП (ток – 6 А; напряжение – 250 В; частота – 50/60 Гц; изготовитель – фирма «Schurter», Германия) [46]

На рис. 19 приведен общий вид другой модификации немецкого СФ, применяемого при подавлении МЭМП, поступающих по проводам электросети [3].



Рис. 19. Общий вид сетевого фильтра подавления МЭМП типа B84115-E-V30 (ток – 6 А; напряжение – 250 В; частота – 50/60 Гц; изготовитель – фирма «Epcos», Германия) [46]

Как правило, СФ являются фильтрами низких частот (ФНЧ), устанавливаемыми в цепях электропитания большинства электронных устройств. На рис. 20 представлен общий вид внутренней «начинки» ЕМІ-фильтра, используемого для защиты средств автоматизации от действия высокочастотных МЭМП [47].



Рис. 20. Внешний вид ЕМІ-фильтра (с открытой пластмассовой крышкой изоляционного корпуса ФНЧ) для защиты от импульсных помех устройств автоматизации и управления (ток – 10 А; напряжение – 260 В; частота – 50/60 Гц) [47]

На рис. 21 приведена электрическая схема помехозащитного ЕМІ-фильтра, применяемого для подавления МЭМП в цепях автоматизации и управления [47].

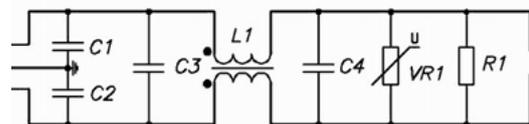


Рис. 21. Принципиальная электрическая схема ЕМІ-фильтра для защиты от импульсных помех цепей автоматизации [47]

13. Применение корректоров, компенсаторов и реле-выключателей напряжения сети для защиты ТС от МЭМП. В тех случаях, когда напряжение сети электропитания средств вычислительной техники и информатизации (СВТИ) снижено до уровня 200 В и менее или повышено до уровня 240 В и более, что приводит к сбоям в работе СВТИ, в целях защиты ТС от воздействия внешних МЭМП обычно применяются корректоры напряжения (КН). На рис. 22 показаны внешние виды помехозащитных устройств типа КН разработки ЗАО «ЭМСОТЕХ» (г. Калуга, РФ) [18].

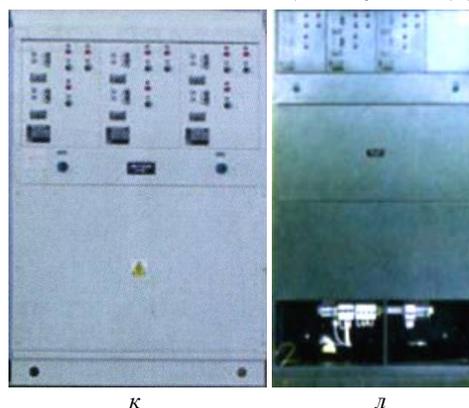


Рис. 22. Внешние виды корректоров напряжения типа КН-Т-63-Б (к, мощность – 63 кВт; ток нагрузки – 95 А) и типа КН-Т-40-С (л, мощность – 40 кВт; ток нагрузки – 60 А) [18]

Для защиты питающей сети от высших гармоник и разгрузки нейтрали в трехфазных сетях электропитания СВТИ применяются компенсаторы искажений напряжения (КИН). На рис. 23, л показан общий вид одного из подобных компенсаторов типа КИН-25-Д (мощность – 25 кВт; ток нагрузки – 40 А) [18]. Для компенсации «провалов» напряжения в сетях электропитания используются срабатывающие за время до

200 мс компенсаторы «провалов» напряжения (КПН) в питающей СВТИ сети, вызываемых воздействием на нее внешних МЭМП [18]. На рис. 23, *н* представлен общий вид одного из таких компенсаторов типа КПН-Т-40-Б (мощность – 40 кВт; ток нагрузки – 60 А) [18].

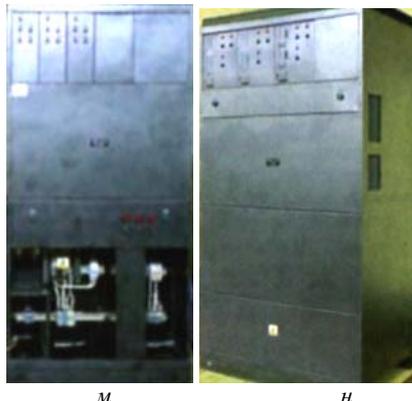


Рис. 23. Общие виды компенсатора искажений напряжения сети типа КИН-25-Д (*м*, мощность – 25 кВт; ток нагрузки – 40 А) и компенсатора «провалов» напряжения сети типа КПН-Т-40-Б (*н*, мощность – 40 кВт; ток нагрузки – 60 А) [18]

Указанные в данном разделе ПЗУ (КН, КИН и КПН) эффективно защищают современные СВТИ, радиоэлектронное и электротехнологическое оборудование, которые критичны к изменению напряжения электропитания на (20-40) % от номинального уровня.

На рис. 24 показан общий вид реле напряжения типа VOLT CONTROL PH-104 (40 А), выпускаемого в Украине и предназначенного для отключения от сети электропитания бытовой (промышленной) электроники мощностью до 9 кВт на требуемую задержку при недопустимых колебаниях напряжения в сети ее электроснабжения с последующим автоматическим включением после восстановления параметров сети [48].



Рис. 24. Внешний вид отечественного реле напряжения типа VOLT CONTROL PH-104 (ток – до 40 А; напряжение – (160-280) В; время задержки – (5-900) с; Украина) [48]

14. Применение электромагнитной развязки внешних цепей для защиты ТС от МЭМП. Одним из эффективных приемов уменьшения влияния внешних МЭМП на функционирование находящихся внутри здания ТС является электромагнитная развязка внешних электрических цепей, «подходящих» к защищаемому зданию с ТС или «отходящих» от него [3, 15, 19]. К основным способам электромагнитной развязки внешних цепей рассматриваемого нами электрооборудования относится [3, 15, 19]: применение развязывающих индуктивностей, часто реализуемых за счет электрических параметров «подходящих» к защищаемым ТС проводов сети электропитания; при-

менение изолирующего трансформатора, устанавливаемого в разрывы электроконтуров и цепей заземления; установка в разрыв пары фазного и нулевого проводов продольного дросселя; использование bifilarного дросселя с ферритовыми кольцами; применение в разрывах цепей оптоэлектронных схем (например, оптронов, диодных оптопар, транзисторных оптопар, волоконно-оптических линий связи и др.).

15. Применение резистивных схем для защиты ТС от МЭМП. В настоящее время при защите мощных высоковольтных конденсаторных батарей емкостью в сотни кДж от аварийных токов микро- и миллисекундной длительности с амплитудой до сотен килоампер, способных вызывать взрывообразное разрушение пробитых электрическим сильноточным разрядом конденсаторов с металлическими и изоляционными корпусами, нашли применение новые резистивные схемы [49, 50]. На рис. 25 приведен общий вид фрагмента мощного высоковольтного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) одномодульного исполнения разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», предназначенного для формирования в лабораторных условиях на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке основных компонент импульсного тока искусственной молнии с нормированными АВП [49] и в котором была применена резистивная схема защиты его конденсаторов от аварийных токов на основе резисторов типа ТВО-60-24 Ом.



Рис. 25. Внешний вид фрагмента мощного высоковольтного ЕНЭ одномодульного исполнения на номинальное напряжение ± 50 кВ и номинальную запасаемую электрическую энергию 420 кДж с его параллельно включенными конденсаторами типа ИК-50-3 в количестве 112 шт. и жестко установленными на их всех высоковольтных выводах защитными высоковольтными объемными постоянными графито-керамическими резисторами типа ТВО-60-24 Ом [49]

Указанные выше защитные схемы базируются на использовании в их составе высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом сопротивления от 24 до 100 Ом, устанавливаемых прямо на высоковольтных выводах отдельных конденсаторов. В [20, 21] были приведены инженерно-технические рекомендации по построению таких защитных схем и приближенные расчетные соотношения по выбору числа защитных резисторов в зависимости от применяемого разработчиком высоковольтной импульсной техники принципа построения (одно- или многомодульного исполнения) мощных конденсаторных батарей электроустановок.

Вывод. Решение глобальной проблемы ЭМС и защиты от поражающего действия МЭМП естественного и искусственного происхождения радиоэлектронного, электротехнического и электроэнергетического оборудования требует для успешного достиже-

ния указанных выше целей более активного и широкого применения на общепромышленном и бытовом уровнях эффективных ПЗУ различного исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем. И.П. Кужекина / Под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
2. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К. и др. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
3. Дьяков А.Ф., Кужекин И.П., Максимов Б.К., Темников А.Г. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 455 с.
4. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты / Пер. с англ. под ред. Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
5. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
6. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
7. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2010. – 407 с.
9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2-97. «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции». – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.
10. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30585-98. «Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний». – К.: Госстандарт Украины, 1998. – 27 с.
11. Стандарт РФ ГОСТ Р 50746-2000. «Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний». – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 42 с.
12. International standard IEC 61000-4-32. Part 4-32. «Testing and measurement techniques-High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium». – Geneva: IEC, 2002. – 108 p.
13. International standard IEC 62305-1:2010. «Protection against lightning.– Part 1: General principles». – Geneva: IEC, 2010. – 56 p.
14. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
15. Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. – Х.: НТУ «ХПИ», – Торнадо, 2005. – 930 с.
16. Козлов Д.А., Кужекин И.П., Хрибар Ж. Испытания объектов на устойчивость к воздействию токов молнии // Технологии электромагнитной совместимости. – 2004. – №2(9). – С. 35-39.
17. Державний стандарт України 2793-94 «Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до потужних електромагнітних завод. Загальні положення». – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.
18. Сухоруков С.А. Помехозащитные устройства ЗАО «ЭМСОТЕХ». – Калуга, 2014. – 72 с.
19. Кравченко В.И. Оружие на нетрадиционных физических принципах: Электромагнитное оружие. – Х.: НТМТ, 2009. – 266 с.
20. Баранов М.И. Основные показатели термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии от аварийных сверхтоков // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2014. – №50(1092). – С. 20-27.
21. Баранов М.И., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 47-52. doi: 10.20998/2074-272x.2015.6.08.
22. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
23. Аполлонский С.М. Расчет электромагнитных экранирующих оболочек. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 144 с.
24. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели / Пер. с англ. под ред. Л.Д. Разумова. – М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.
25. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
26. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. «Типова інструкція СОУ 31.2-21677681-19-2009». – К.: Мінпалівернерго України, 2010. – 54 с.
27. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с.
28. Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок // Электротехніка і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272x.2014.4.13.
29. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
30. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
31. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – №4. – С. 29-32.
32. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 54149-2010. «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – М.: Стандартинформ, 2010. – 52 с.
33. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. Генератор коммутационных аperiodических импульсов сверхвысокого напряжения для испытаний электрической прочности изоляции технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – №6. – С. 30-35. doi: 10.1134/s0020441213050126.
34. International standard IEC 62305-4:2010. «Protection against lightning. – Part 4: Electrical and electronic systems within structures». – Geneva: IEC, 2010. – 59 p.
35. <http://www.schrack-technik.ru/shop/grozozashchitnyerazrjadniki-razrjadniki-dlja-zashchity-ot-perenaprzazhenija-i-zazemlenie.html>.
36. <http://www.plasmalabs.ru/files/products/sverhmoshchnie.pdf>.
37. http://newet.ru/catalog/pomekhozashchitnoe_oborudovanie_emsotekh.
38. <http://electricalschool.info/main/elsnabg/220-primenenie-ogranichitelej.html>.
39. Демьяненко К.Б., Титков В.В. Сравнение основных технических характеристик ОПН в фарфоровой и полимерной изоляции производства ООО «СЕВЗАППРОМ» // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – №2. – С. 31-33.
40. Шумилов Ю.Н., Шумилов М.Ю., Таран В.Н., Ганпанцурова С.Ю., Ковтун А.Н., Тельманова Е.Н., Небогатая В.В., Задержкин А.А., Ленева Д.Н. Нелинейные ограничители перенапряжений 3-150 кВ в полимерном корпусе // Энергетика та електрифікація. – 2010. – №9. – С. 26-30.
41. <http://electric-tolk.ru/ogranichiteli-perenapryazhenij-zashhita-ot-molnii>.

42. http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_01/stat-32.htm.

43. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.

44. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

45. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х: Точка, 2014. – 400 с.

46. <http://www.musidora.ru/dimFiltrs.htm>.

47. <http://www.symmetron.ru/suppliers/infineon/files/pdf/infineon/INF13.pdf>.

48. <http://bt.rozetka.com.ua/3502659/c3502659/?gclid=CPeh-OidlckCFebhgoddGgA1A>.

49. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85. doi: 10.1134/s0020441208030123.

50. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированной временной формой 10/350 мкс и амплитудой $\pm(100-200)$ кА // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – №6. – С. 39-44. doi: 10.1134/s0020441215060032.

REFERENCES

1. Khabiger E. *Elektromagnitnaia sovmestimost'. Osnovy ee obespecheniia v tekhnike* [Electromagnetic compatibility. Fundamentals of its maintenance technique]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 304 p. (Rus).
2. Dyakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike* [Electromagnetic compatibility in power engineering and electrical engineering]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 768 p. (Rus).
3. Dyakov A.F., Kuzhekin I.P., Maksimov B.K., Temnikov A.G. *Elektromagnitnaya sovmestimost' i molniezashchita v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility and lightning protection in the power]. Moscow, MEI Publishing House, 2009. 455 p. (Rus).
4. Ricketts L.U., Bridges J.E., Mayletta J. *Elektromagnitnij impul's i metody zashchity* [Electromagnetic pulse and methods of protection]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 328 p. (Rus).
5. Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I. *Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomehi* [Radioelectronic means and powerful electromagnetic hindrances]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1987. 256 p. (Rus).
6. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. *Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ioniziruyushchim i elektromagnitnym izlucheniyam* [Ensuring stability of communications equipment to the ionizing and electromagnetic of radiations]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1988. 296 p. (Rus).
7. Kravchenko V.I. *Hrozozashchita radioelektronnykh sredstv* [Lightning protection of radioelectronic facilities]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1991. 264 p. (Rus).
8. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriia elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2010. 407 p. (Rus).
9. GOST 1516.2-97. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napriazhenie 3 kV i vyshe. Obshchie metody ispytaniia elektricheskoi prochnosti izolatsii* [GOST 1516.2-97. Electrical equipment and electrical options of alternating current voltage 3 kV and above. Common test methods for dielectric strength]. Minsk, Publishing house of standards, 1998. 31 p. (Rus).
10. GOST 30585-98. *Stoikost' k vozdeistviu grozovykh razriadov. Tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytaniia* [GOST 30585-98. Resistance to lightning. Technical requirements and test methods]. Kiev, State Standard of Ukraine Publ., 1998. 27 p. (Rus).
11. GOST R 50746-2000. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Tekhnicheskie sredstva dlia atomnykh stant-*
12. *sii. Trebovaniia i metody ispytaniia* [GOST R 50746-2000. Compatibility of technical equipment. Technical equipment for nuclear power plants. Requirements and test methods]. Moscow, Publishing House of Standards, 2001. 42 p. (Rus).
13. IEC 61000-4-32. Part 4-32. Testing and measurement techniques-High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium. Geneva, IEC Publ., 2002. 108 p.
14. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010. 56 p.
15. GOST R MEK 62305-1-2010. *Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy* [GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 46 p. (Rus).
16. Brzhezitskiy V.A., Isakova A.V., Rudakov V.V. *Tekhnika i elektrofizika vysokikh napruh* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkov, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
17. Kozlov D.A., Kuzhekin I.P., Hribar J. Testing objects for resistance to lightning currents. *Technologies of electromagnetic compatibility*, 2004, no.2(9), pp. 35-39. (Rus).
18. DSTU 2793-94. *Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromagnitna. Stiikist do potuzhnykh elektromagnitnykh zavrad. Zahalni polozhennia* [DSTU 2793-94. Electromagnetic compatibility of hardware. Stability to the powerful electromagnetic hindrances. General principles]. Kiev, State Standard of Ukraine Publ., 1994. 24 p. (Ukr).
19. Suhorukov S.A. *Pomohozashhitnye ustrojstva ZAO "EMSOTEH"* [Hindrance protective devices of CCA "EMSOTEH"]. Kaluga, 2014. 72 p. (Rus).
20. Kravchenko V.I. *Weapon on non-traditional physical principles: Electromagnetic weapon*. Kharkov, NTMT Publ., 2009. 266 p. (Rus).
21. Baranov M.I. Key indicators thermo protection in high-voltage capacitors charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage of emergency overcurrent. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp.20-27. (Rus).
22. Baranov M.I., Rudakov S.V. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy from emergency currents. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 47-52. (Rus). doi: 10.20998/2074-272x.2015.6.08.
23. Shapiro D.N. *Osnovy teorii elektromagnitnogo ekranirovaniia* [Basic theory of electromagnetic screening]. Leningrad, Energy Publ., 1975. 112 p. (Rus).
24. Apollonsky S.M. *Raschet elektromagnitnykh ekraniruyushchih obolochek* [Calculation of electromagnetic shielding of shells]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 144 p. (Rus).
25. Vance E.F. *Vliianie elektromagnitnykh polej na ekranirovannye kabeli* [The impact of electromagnetic fields on the shielded cables]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1982. 120 p. (Rus).
26. Ryabkova E.Y. *Zazemleniia v ustanovkah vysokogo napryazheniia* [Grounding installations high voltage]. Moscow, Energy Publ., 1978. 224 p. (Rus).
27. SOU 31.2-21677681-19:2009. *Viprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktziya*. [SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
28. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7. Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazheniya elektrichnim strumom [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. (Ukr).
29. Koliushko G.M., Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 65-70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272x.2014.4.13.
30. Kostruba S.I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchih ustrojstv* [Measurement of electrical parame-

- ters of the earth and grounding device]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. (Rus).
30. Burgsdorf V.V., Jacobs A.I. *Zazemlyayushchie ustrojstva elektroustanovok* [Earthing devices of electric options]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
31. Borisov R.K., Koliushko G.M., Grimud G.I. Technique to study the ground grids of electric power facilities. *Energy and Electrification*, 2000, no.4, pp. 29-32. (Rus).
32. GOST R 54149-2010. *Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia* [GOST R 54149-2010. Norms of quality of electric energy in power systems for general purposes]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 52 p. (Rus).
33. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2013, vol.56, no.6, pp. 653-658. doi: 10.1134/s0020441213050126.
34. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning.– Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, IEC Publ., 2010. 59 p.
35. Available at: <http://www.schrack-technik.ru/shop/grozozashchitnye-razrjadniki-razrjadniki-dlja-zashchity-ot-perenapryazhenija-i-zazemlenie.html> (accessed 21 May 2015). (Rus).
36. Available at: <http://www.plasmalabs.ru/files/products/sverhmoshchnie.pdf> (accessed 10 October 2015). (Rus).
37. Available at: http://newet.ru/catalog/pomekhozashchitnoe_oborudovanie_ems_otekh (accessed 21 February 2014). (Rus).
38. Available at: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/220-primeneniie-ogranichitelej.html> (accessed 28 September 2014). (Rus).
39. Dem'yanenko K.B., Titkov V.V. Comparison of the main technical characteristics of OPN in porcelain and polymer insulation of LLC "SEVZAPPROM". *ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2007, no.2. pp. 31-33. (Rus).
40. Shumilov Yu.N., Shumilov M.Yu., Taran V.N. Ganpanturova S.Iu., Kovtun A.N., Tel'manova E.N., Nebogataia V.V., Zaderikhin A.A., Lenev D.N. Non-linear terminators of over-voltage 3-150 kV in polymer corps. *Energetic and electrification*, 2010, no.9, pp. 26-30. (Rus).
41. Available at: <http://electric-tolk.ru/ogranichiteli-perenapryazhenij-zashhita-ot-molnii> (accessed 23 July 2015). (Rus).
42. Available at: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_01/stat-32.htm (accessed 10 April 2015). (Rus).
43. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
44. Komel'kov V.S. *Tehnika bol'shikh impul'snyh tokov i magnitnyh polej*. [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
45. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
46. Available at: <http://www.musidora.ru/dimFiltrs.htm> (accessed 21 May 2015). (Rus).
47. Available at: <http://www.symmetron.ru/suppliers/infineon/files/pdf/infineon/INF13.pdf> (accessed 10 April 2014). (Rus).
48. Available at: <http://bt.rozetka.com.ua/3502659/c3502659/?gclid=CPEh-OidlckCFebhgoddGgA1A> (accessed 12 July 2016). (Rus).
49. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Pribory i tehnika eksperimenta – Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
50. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10 μs/350 μs with an amplitude of ±(100–200) kA. *Instruments and Experimental Technique*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.

Поступила (received) 25.11.2015

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., г.л.н.с.,
НИПКИ «Молния»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov
Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 33: Electromagnetic compatibility and protection from action of powerful electromagnetic interference of radioelectronic, electrical engineering and electric power equipment.

Purpose. Implementation of brief analytical review of basic scientific and technical achievements in area of electromagnetic compatibility (EMC) and protection from destabilizing and striking action of powerful electromagnetic interference (PEMI) of natural and artificial origin of radioelectronic, electrical engineering and electric power equipment. **Methodology.** Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information in a sphere EMC and such areas of knowledge's as radioelectronics, electrical engineering and electric power engineering. **Results.** A brief scientific and technical review is resulted modern positions problems EMC and protection of equipment from action on them PEMI. It is shown that PEMI can result in failures in-process and death of examined equipment. Annual harm in the industrially developed countries of the world from the striking affecting of PEMI modern equipment with integral microcircuits and semiconductor devices can make ten of milliards of USD. The basic methods of protection of equipment are resulted from PEMI and protective devices (PD), intended for the increase of effectiveness of modern equipment to the action of external PEMI. Principles of work of the resulted PD and their basic technical descriptions are described. **Originality.** On the basis of materials of scientific monographs, journal publications, normative documents and internet-reports systematization of basic PD, in-use presently in an area EMC and protection of different equipment from the hazard agency of external PEMI is executed. **Practical value.** Popularization of scientific and technical knowledge's in an area EMC and protection of modern equipment from a dangerous action on them PEMI. Formulation of important for society scientific and technical problems and tasks, arising up in an area EMC and providing of the reliable functioning of modern equipment in power electromagnetic interference. References 50, figures 25.

Key words: electromagnetic compatibility, equipment, powerful electromagnetic interference, protection of equipment from electromagnetic interference, protective devices, review.