

К IV Международной научно-технической конференции «Информационные и управляющие системы АЭС: аспекты безопасности»

УДК 621.039.058

Ю. В. Розен

Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности

Электромагнитная совместимость компонентов информационных и управляющих систем (2): устойчивость к электромагнитным помехам

Вторая из серии статей, посвящённых вопросам электромагнитной совместимости компонентов информационных и управляющих систем (ИУС), важных для безопасности АЭС. Рассматриваются методы проверки помехоустойчивости, регламентированные в международных, европейских и национальных стандартах Украины и России.

Ю. В. Розен

Електромагнітна сумісність компонентів інформаційних та керуючих систем (2): стійкість до електромагнітних завад

Друга із серії статей, присвячених питанням електромагнітної сумісності компонентів інформаційних і керуючих систем (ІКС), важливих для безпеки АЕС. Розглядаються методи перевірки завадостійкості, регламентовані в міжнародних, європейських і національних стандартах України та Росії.

Помехоустойчивость определяют как способность оборудования удовлетворительно функционировать в определённой электромагнитной обстановке [1]. Помехоустойчивость, вместе с ограничением эмиссии электромагнитных помех, обеспечивает электромагнитную совместимость современного электронного оборудования, и рассматривается как одно из важных свойств эксплуатационно-автономных составных частей ИУС (далее — изделий). Помехоустойчивость нормируют путём установления параметров испытательных воздействий, имитирующих помехи каждого вида, с указанием мест их приложения и способов подачи воздействий, при которых изделие должно правильно функционировать во время испытаний. Виды помех, наиболее характерных для условий эксплуатации изделий на АЭС, места приложения испытательных воздействий («порты» изделия), степени жесткости испытаний (значения «главного» параметра испытательного воздействия для каждого вида помех), а также критерии оценки результатов испытаний (правильное функционирование, т. е. выполнение предписанных функций в полном объёме, отсутствие ложных выходов сигналов и сохранение характеристик изделия в установленных пределах во время и после подачи испытательного воздействия) рассмотрены в [2].

Степень жесткости испытаний выбирают в отдельности для каждого вида помех исходя из оценки электромагнитной обстановки в местах размещения изделия, так, чтобы главный параметр испытательного воздействия превышал соответствующий параметр помехи, возможной при самых неблагоприятных условиях эксплуатации. Уверенность в этом должна, очевидно, повышаться для изделий, более влияющих на безопасность; с этой целью при выборе степени жесткости предложено, наряду с электромагнитной обстановкой, учитывать также класс безопасности изделия. Оценка электромагнитной обстановки (лёгкая, средней жесткости, жесткая, крайне жесткая) производится на основании качественных признаков, характеризующих условия размещения, установки и монтажа изделия, которые актуальны для каждого вида помех [2]; класс безопасности выбирается в соответствии с категорией той функции, в реализации которой непосредственно участвует это изделие [1], [31].

В первой статье этой серии [2] предложены общие правила, которыми следует руководствоваться при планировании и проведении испытаний помехоустойчивости. В публикуемой статье рассматриваются методы проверки (испытаний) помехоустойчивости изделий для оценки их соответствия требованиям норм и правил НП 306.5.02/3.035 [3], стандартов ИЕС [4]–[14], а также стандартов, действующих в Украине [15]–[19] и в России [20]–[30]. Для каждого вида помех приведены параметры испытательных воздействий, требования к характеристикам испытательного генератора (ИГ) и устройств, через которые к испытываемому изделию подключается ИГ и вспомогательное оборудование (источники электропитания, имитаторы входных сигналов, средства контроля выходных сигналов и т. п.), схема организации рабочего места и процедура проверки устойчивости изделия к помехам этого вида.

Наносекундные импульсные помехи («быстрые переходные процессы и всплески») [3], [6], [18], [22] могут быть вызваны коммутационными процессами, возникающими в цепях с индуктивными нагрузками. Параметры испытательных воздействий, имитирующих такие помехи, определяют на выходе испытательного генератора:

напряжение на ненагруженном выходе ИГ (главный параметр) — $(0,25; 0,5; 1; 2; 4 \text{ кВ}) \pm 10 \%$;

на сопротивлении нагрузки 50 Ом : форма импульса тока — треугольная; время нарастания тока (между 10 и 90 %) — $5 \text{ нс} \pm 30 \%$; длительность импульса тока (на уровне 50 %) — $50 \text{ нс} \pm 30 \%$;

полярность импульсов — положительная и отрицательная; частота импульсов — $5,0 \text{ кГц} \pm 20 \%$ ($2,5 \text{ кГц}$ при напряжении 4 кВ);

длительность пачки импульсов — $15 \text{ мс} \pm 20 \%$; период следования пачек импульсов — $300 \text{ мс} \pm 20 \%$; внутреннее сопротивление ИГ в диапазоне частот от 1 до 100 МГц — $50 \text{ Ом} \pm 20 \%$.

Устойчивость изделия должна быть обеспечена при подаче испытательных воздействий:

на линии электропитания постоянного и переменного тока; на экранированные и / или неэкранированные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных; на порты защитного и сигнального заземления.

Для предотвращения влияния испытательных воздействий на подключённое вспомогательное оборудование при подаче испытательных воздействий на порты электропитания применяют устройства развязки, обеспечивающие при затухании в цепи связи менее 2 дБ затухание в цепи развязки (при измерении по схеме «провод — земля») более 20 дБ и переходное затухание между двумя любыми линиями более 30 дБ . В качестве устройств развязки используют дроссели с индуктивностью не менее 100 мкГн , включённые последовательно в каждую линию электропитания, и конденсаторы, включённые со стороны вспомогательного оборудования между каждой парой линий и между каждой линией и землёй (или линией заземления в кабеле электропитания).

Изделие устанавливают (рис. 1) на изолирующей подставке толщиной $0,1 \pm 0,01 \text{ м}$ (настольные — на высоте $0,8 \pm 0,08 \text{ м}$) над пластиной заземления, соединённой с системой защитного заземления лаборатории. Порт заземления испытываемого изделия соединяют с пластиной заземления в соответствии с технической документацией проводниками с минимальной индуктивностью. Устройства развязки включают во все линии электропитания, подлежащие проверке. Расстояние по линиям электропитания между портами изделия и устройствами развязки должно быть не более 1 м .

Подачу испытательных воздействий (импульсов ИГ) на линии электропитания производят:

при питании однофазным или трёхфазным переменным током с заземляющим проводом — по схеме «провод — земля»: один вывод ИГ подключают к пластине заземления, другой — поочередно к каждой линии электропитания (включая заземляющий провод) через конденсатор ёмкостью 33 нФ ;

при питании однофазным или трёхфазным переменным током без заземляющего провода и при питании постоянным током — по схеме «провод — провод»: выводы ИГ поочередно подключают между каждой парой линий электропитания через конденсаторы ёмкостью 33 нФ (должен использоваться ИГ с незаземлённым выходом).

Испытательные воздействия подают на экранированные и / или неэкранированные соединительные линии с помощью ёмкостных клещей связи, которые должны охватывать все линии, идущие в одном или нескольких кабелях; при этом распределённая ёмкость между выводом для подключения испытательного генератора и кабелем должна составлять от 50 до 200 пФ . Ёмкостные клещи связи уста-

навливают на изолирующей подставке толщиной $0,1 \pm 0,01 \text{ м}$ над пластиной заземления. Расстояние по кабелю от испытываемого изделия до ближнего к нему конца клещей должно быть не более 1 м , от вспомогательного оборудования до ближнего к нему конца клещей — по крайней мере, в 5 раз больше. ИГ подключают к тому концу клещей, который расположен ближе к изделию.

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 4]. Каждую проверку проводят при обеих полярностях импульсов ИГ, длительность воздействия — не менее 1 мин .

Кроме испытаний в лабораторных условиях, могут быть проведены дополнительные испытания на месте эксплуатации. В этом случае пластину заземления укладывают рядом с изделием и соединяют с контуром защитного заземления, ИГ устанавливают на пластине заземления на расстоянии не более 1 м от изделия и соединяют его корпус с пластиной заземления. Импульсы ИГ подают поочередно между пластиной заземления и:

каждой клеммой порта электропитания (постоянного и переменного тока) — через конденсатор ёмкостью 33 нФ ;

каждым из портов защитного и сигнального заземления — через конденсатор ёмкостью 33 нФ ;

всеми соединительными линиями каждого кабеля — с помощью ёмкостных клещей связи (могут быть заменены проводящей лентой либо фольгой, навитой на проверяемые кабели) или непосредственно на клеммы портов ввода, вывода, связи через конденсатор ёмкостью 100 пФ .

Микросекундные импульсные помехи большой энергии («всплески напряжения») [3], [7], [23] могут быть вызваны изменением нагрузки, переключениями и срабатыванием защитных устройств в мощных системах электроснабжения (или в системах малой мощности — в непосредственной близости от изделия), повреждениями силового электрооборудования (короткие замыкания, дуговые разряды), а также ударами молний в наружные цепи, находящиеся вблизи объекты или в грунт. Параметры испытательных воздействий, имитирующих микросекундные импульсные помехи, определяют на незаземлённых выходах ИГ:

в режиме холостого хода (сопротивление нагрузки не менее 10 кОм): форма импульса напряжения — треугольная; пиковое значение напряжения (главный параметр) — $(0,5; 1,0; 2,0; 4,0 \text{ кВ}) \pm 10 \%$; время нарастания напряжения (между 10 и 90 %) — $1,0 \text{ мкс} \pm 30 \%$; длительность импульса напряжения (на уровне 50 %) — $50 \text{ мкс} \pm 20 \%$;

в режиме короткого замыкания (сопротивление нагрузки не более $0,1 \text{ Ом}$): форма импульса тока — треугольная; пиковое значение тока — $(0,25; 0,5; 1,0; 2,0 \text{ кА}) \pm 10 \%$; время нарастания тока (между 10 и 90 %) — $6,4 \text{ мкс} \pm 20 \%$; длительность импульса тока (на уровне 50 %) — $16 \text{ мкс} \pm 20 \%$;

полярность импульсов — положительная и отрицательная; сдвиг по фазе по отношению к напряжению питающей сети переменного тока — от 0 до 360° ;

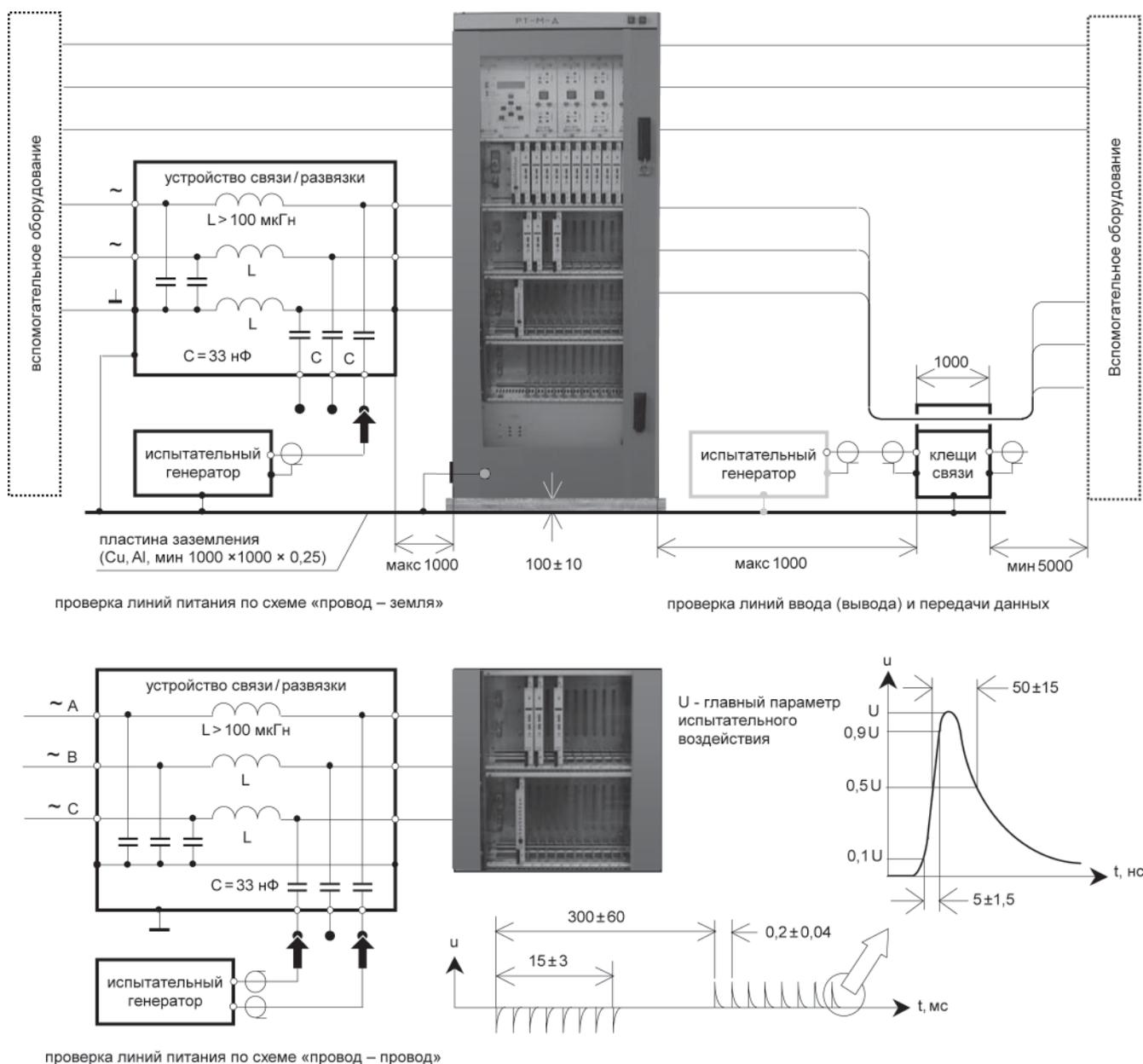
выходное сопротивление ИГ — 2 Ом .

Устойчивость изделия должна быть обеспечена при подаче испытательного воздействия (рис. 2):

на линии электропитания постоянного и переменного тока;

на неэкранированные несимметричные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных;

на неэкранированные симметричные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных;



Примечание. Испытательный генератор соединяют с устройствами связи / развязки и клеммами связи коаксиальным кабелем

Рис. 1. Испытания устойчивости к наносекундным импульсным помехам

на экраны кабелей, соединённые с корпусом испытываемого изделия.

На линии, подключенные к портам электропитания однофазным или трёхфазным переменным током без заземляющего провода и к портам питания постоянным током, испытательные воздействия подают по схеме «провод — провод» (поочередно между каждой линией электропитания и каждой из остальных линий, присоединённых к тому же порту электропитания, через устройство связи — конденсатор ёмкостью 18 мкФ). На линии, подключенные к портам электропитания однофазным или трёхфазным переменным током с заземляющим проводом в кабеле электропитания, испытательные воздействия подают по схеме «провод — провод» и «провод — земля» (поочередно между портом защитного заземления и каждой линией электро-

питания; в качестве устройства связи используют конденсатор ёмкостью 9 мкФ и последовательно включённый с ним резистор с сопротивлением 10 Ом). Устройства развязки представляют собой дроссели с индуктивностью 1,5 мГн, включённые последовательно в каждую линию электропитания, и конденсаторы, включённые со стороны вспомогательного оборудования между каждой парой линий и между каждой линией и землёй (или проводом заземления в кабеле электропитания).

Подавая испытательные воздействия на неэкранированные несимметричные соединительные линии, выводы ИГ подключают по схеме «провод — провод» (поочередно между каждой соединительной линией и каждой из остальных линий, присоединённых к тому же порту) и по схеме «провод — земля» (поочередно между портом защитного зазем-

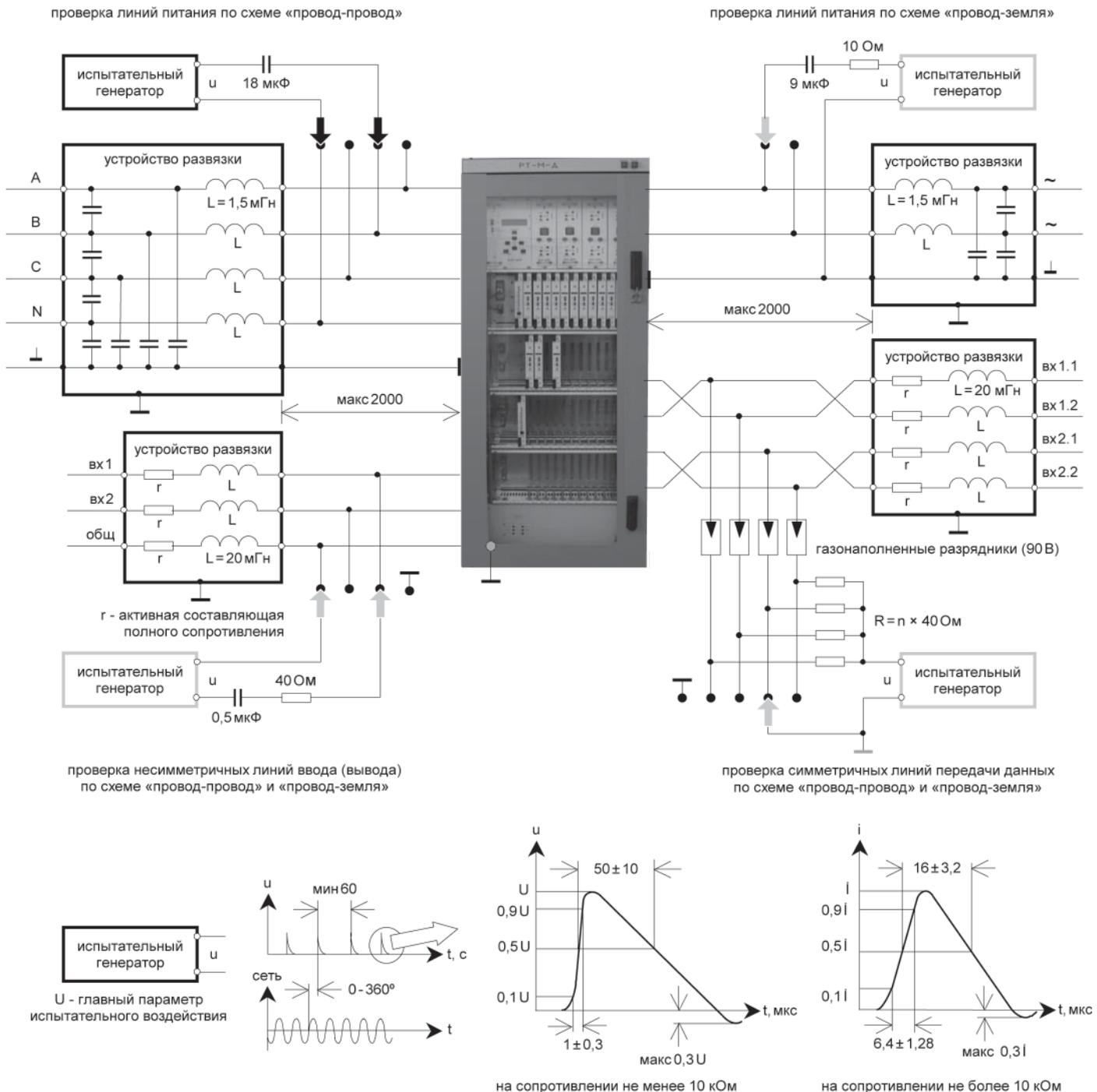


Рис. 2. Испытания устойчивости к микросекундным импульсным помехам большой энергии

ления и каждой соединительной линией). Устройство связи — или конденсатор (0,5 мкФ) и последовательно включённый с ним резистор (40 Ом), или газонаполненный разрядник с напряжением зажигания 90 В. Устройства развязки — дроссели с индуктивностью 20 мГн, включённые последовательно в каждую соединительную линию (активную часть полного сопротивления дросселя выбирают из условия допустимого ослабления входного сигнала).

При подаче испытательных воздействий на незэкранированные симметричные соединительные линии по схеме «провод — земля» один вывод ИГ подключают к порту защитного заземления, второй — одновременно ко всем

линиям проверяемого порта. Устройство связи должно иметь один вход для подключения испытательного генератора, n соединённых с ним резисторов с сопротивлением $40 \times n$ Ом каждый и n газонаполненных разрядников, последовательно включённых с резисторами (n — число линий проверяемого порта). В качестве устройств развязки используют дроссели с индуктивностью 20 мГн, включённые последовательно в каждую соединительную линию. Подачу испытательных воздействий по схеме «провод — провод» производят через те же устройства связи и развязки, поочередно подключая каждый резистор к порту защитного заземления.

Расстояние по линиям электропитания и соединительным линиям между портами испытываемого изделия и устройствами связи / развязки должно быть не более 2 м.

При подаче испытательных воздействий на экраны кабелей устройства связи и развязки не используют. Выходы ИГ подключают непосредственно между незаземлённым корпусом изделия, с которым соединён экран кабеля, и портом защитного заземления другого (заземлённого) изделия или вспомогательного оборудования; питание должно осуществляться через изолирующие (разделительные) трансформаторы. При испытаниях необходимо применять экранированный кабель, тип и максимальная допускаемая длина которого указаны в технической документации, или кабель длиной 20 м, если допускаемая длина не указана.

Степень жёсткости испытаний следует задавать в зависимости от схемы подачи испытательных воздействий, руководствуясь [2, табл. 3], значение главного параметра воздействия определяют по [2, табл. 5].

На линии электропитания переменного тока импульсы от ИГ подают в моменты прохождения кривой питающего напряжения через нуль и через оба амплитудных значения (в обоснованных случаях может быть регламентирован другой сдвиг импульсов по фазе, фиксированный или изменяющийся в пределах от 0 до 360°). При каждой проверке подают не менее пяти импульсов положительной и отрицательной полярности с интервалами 1 мин. Испытания должны проводиться на изделиях, ранее не подвергавшихся таким проверкам. После испытаний поставка для использования по назначению возможна только после замены в них встроенных элементов защиты от перенапряжений, имеющих ограниченный ресурс.

Колебательные затухающие помехи («колебательные волны») [12], [28] с малой частотой повторения (далее — одиночные колебательные помехи) могут возникать при коммутационных процессах в силовых цепях, цепях управления и сигнализации, авариях и пробоях изоляции в системах электроснабжения, а также при непрямым воздействиях ударов молний. Колебательные затухающие помехи с высокой частотой повторения (далее — повторяющиеся колебательные помехи) могут возникать в результате процессов коммутации в мощных промышленных установках и при срабатывании выключателей высокого и среднего напряжения на электрических подстанциях. Параметры испытательных воздействий определяют на незаземлённых выходах ИГ*:

форма импульса — затухающая синусоида;

полярность первого полупериода — положительная и отрицательная;

при имитации одиночных колебательных помех: частота колебаний — 100 кГц $\pm 10\%$; пиковое значение напряжения холостого хода (главный параметр) — (0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 кВ) $\pm 10\%$; время нарастания первой полуволны напряжения (между 10 и 90 % пикового значения) — 0,5 мкс $\pm 20\%$; затухание в течение одного полупериода — (60 ± 10) %; выходное сопротивление ИГ — (12; 30; 200 Ом) $\pm 20\%$; пиковое значение тока короткого замыкания — (333; 133; 20 кА) $\pm 20\%$; время нарастания первой полуволны тока (между 10 и 90 % пикового значения) — 1,0 мкс $\pm 20\%$; сдвиг по фазе по отношению к питающей сети — от 0 до 360° $\pm 5^\circ$;

при имитации повторяющихся колебательных помех: частота колебаний — (0,1; 1,0 МГц) $\pm 10\%$; пиковое значе-

* Испытаниям устойчивости к повторяющимся колебательным помехам подвергают изделия, предназначенные для эксплуатации на электрических подстанциях высокого и среднего напряжения и на промышленных предприятиях, имеющих собственные трансформаторные подстанции.

ние напряжения холостого хода (главный параметр) — (0,25; 0,5; 1,0; 2,0 кВ) $\pm 10\%$; время нарастания первой полуволны напряжения (между 10 и 90 % пикового значения) — 75 нс $\pm 20\%$; затухание между третьим и шестым периодами — (50 ± 10) %; выходное сопротивление ИГ — 200 Ом $\pm 20\%$; частота повторения — 40 Гц $\pm 10\%$ (при частоте колебаний 0,1 МГц), 400 Гц $\pm 10\%$ (при частоте 1,0 МГц).

Устойчивость должна быть обеспечена при подаче испытательных воздействий, имитирующих одиночные и / или повторяющиеся колебательные помехи:

на линии электропитания постоянного и переменного тока; на неэкранированные несимметричные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных;

на неэкранированные и экранированные симметричные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных.

Испытания проводят с использованием пластины заземления (рис. 3) или проводников заземления, каждый из которых соединяет испытываемое изделие, вспомогательное оборудование, ИГ и устройство связи / развязки с общей точкой системы защитного заземления. При использовании пластины заземления изделие устанавливают над ней на изолирующей подставке толщиной 0,1 $\pm 0,01$ м; его порт защитного заземления, вспомогательное оборудование, корпус ИГ и устройства связи / развязки соединяют с пластиной заземления. Заземляющие проводники должны быть такими короткими, насколько это практически достижимо. ИГ соединяют с устройством связи / развязки кабелем длиной 1 м. Соединительные линии ввода, вывода, передачи данных прокладывают над пластиной заземления с применением изоляционных опор толщиной 0,1 м на длине не менее 1 м от испытываемого изделия.

При подаче испытательных воздействий на линии, подключенные к портам электропитания однофазным или трёхфазным переменным током без заземляющего провода и к портам питания постоянным током, испытательные воздействия подают по схеме «провод — провод» (поочередно между каждой линией электропитания и каждой из остальных линий, присоединённых к тому же порту электропитания). На линии, подключённые к портам электропитания однофазным или трёхфазным переменным током с заземляющим проводом в кабеле, испытательные воздействия подают по схемам «провод — провод» и «провод — земля» (поочередно между пластиной заземления или портом защитного заземления и каждой линией электропитания), при этом питание изделия осуществляется через изолирующие (разделительные) трансформаторы. Выходное сопротивление ИГ, имитирующего колебательные помехи: одиночные — 12 Ом (если линии электропитания подключаются непосредственно к зажимам соответствующего порта) или 30 Ом (если изделие подключается к источнику питания с помощью штепсельной розетки), повторяющиеся — 200 Ом. В качестве устройств связи используют конденсаторы ёмкостью не менее 10 мкФ (при выходном сопротивлении ИГ 12 Ом), не менее 3 мкФ (при выходном сопротивлении 30 Ом) или 0,5 мкФ (при выходном сопротивлении 200 Ом); допускается использование устройств связи других типов (например, газонаполненных разрядников или кремниевых стабилитронов). В качестве устройств развязки используют дроссели, включённые в каждую линию электропитания, и конденсаторы, включённые со стороны вспомогательного оборудования между каждыми двумя линиями электропитания и между каждой линией и землёй (или линией защитного заземления в кабеле электропитания). Ослабление колебательных помех в устройстве развязки должно быть не менее 30 дБ

при подаче испытательного воздействия по схеме «провод — провод», и не менее 20 дБ при подаче испытательного воздействия по схеме «провод — земля».

Испытательные воздействия на неэкранированные несимметричные соединительные линии подаются по схеме «провод — провод» (поочередно между каждой соединительной линией и каждой из остальных соединительных линий, подключённых к тому же порту) и по схеме «провод — земля» (поочередно между пластиной заземления или портом защитного заземления и каждой соединительной линией). В качестве устройства связи используют конденсаторы ёмкостью 0,5 мкФ, газонаполненные разрядники или кремниевые стабилитроны. ИГ должен иметь незаземлённый симметричный выход (ёмкостная асимметрия выводов относительно заземления не должна превышать 10 %) и выходное сопротивление 200 Ом. Выходное сопротивление ИГ может быть уменьшено до 30 или 12 Ом, при этом ёмкость конденсаторов устройства связи увеличивают соответственно до 3 или 10 мкФ. В качестве устройств развязки используют дроссели, включённые в каждую соединительную линию, и конденсаторы, включённые со стороны вспомогательного оборудования между каждыми двумя соединительными линиями и между каждой линией и землёй. Ослабление колебательных помех в устройстве развязки должно быть не менее 30 дБ при подаче испытательного воздействия по схеме «провод — провод» и по схеме «провод — земля».

При подаче испытательных воздействий на симметричные соединительные линии устройства связи и развязки не используют. Выводы ИГ с выходным сопротивлением 12 Ом подключают непосредственно между незаземлённым корпусом испытываемого изделия и портом защитного заземления другого (заземлённого) изделия или вспомогательного оборудования, которое соединяется с испытываемым изделием. При испытаниях должен применяться экранированный кабель, тип и максимальная допускаемая длина которого указаны в технической документации, или кабель длиной 10 м, если допускаемая длина не указана. При использовании экранированного кабеля, экран которого заземлён на одном конце, незаземлённый конец экрана соединяют через конденсатор ёмкостью 0,5 мкФ с корпусом испытываемого изделия или вспомогательного оборудования, к которому присоединён кабель.

При проведении испытаний устойчивости к одиночным колебательным помехам степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 6]. Проверяют правильность функционирования изделия, подавая поочередно на каждую линию не менее 5 импульсов с положительной и отрицательной полярностью первого полупериода. Импульсы должны быть синхронизированы с питающим напряжением переменного тока и подаваться на испытываемые цепи в моменты прохождения кривой питающего напряжения через нуль (в обоснованных случаях может быть регламентирован другой сдвиг импульсов по фазе, фиксированный или изменяющийся в пределах от 0 до 360°). Интервал между импульсами должен составлять 1 с (для испытательного генератора с выходным сопротивлением 200 Ом), 6 с (при выходном сопротивлении 30 Ом) или 10 с (при выходном сопротивлении 12 Ом).

При испытаниях устойчивости к повторяющимся колебательным помехам выбирают степень жёсткости испытаний, руководствуясь [2, табл. 2], при этом электромагнитную обстановку считают лёгкой, если само изделие и со-

единённое с ним оборудование размещены в помещении пункта управления; средней жёсткости, если изделие, установленное в помещении пункта управления или контролируемого пункта, соединено с оборудованием, расположенным в помещении контролируемого пункта и / или в зале релейной защиты; жёсткой, если изделие установлено в зале релейной защиты. Значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 6]. Проверяют правильность функционирования изделия, подавая поочередно на каждую линию импульсы от испытательного генератора (с положительной и отрицательной полярностью первого полупериода) сначала при частоте затухающих колебаний 100 кГц и частоте повторения импульсов 40 Гц, затем при частоте затухающих колебаний 1 МГц и частоте повторения импульсов 400 Гц; синхронизация импульсов с питающим напряжением переменного тока не требуется. Продолжительность каждого воздействия должна быть не менее 2 с, интервал между воздействиями — не менее 1 с.

Испытания должны проводиться на изделиях, ранее не подвергавшихся таким проверкам. После испытаний поставка для использования по назначению возможна только после замены в них встроженных элементов защиты от перенапряжений, имеющих ограниченный ресурс.

Кондуктивные помехи в полосе частот от 0 до 150 кГц [13], [29] представляют собой общие несимметричные напряжения* постоянного тока и переменного тока с фиксированной и изменяющейся частотой. Помехи такого вида могут возникать при аварийных режимах в силовых распределительных сетях постоянного и переменного тока, протекании токов утечки в системах заземления, а также при включениях, работе, выключениях и / или повреждениях силового электронного оборудования. Кондуктивная связь возникает за счёт асимметрии полного (индуктивного, ёмкостного и / или омического) сопротивления между источниками и приёмниками помех.

Параметры испытательных воздействий, имитирующих кондуктивные помехи, определяют на выходе ИГ:

постоянного тока: напряжение холостого хода (главный параметр) — (1; 3; 10; 30; 100 В) $\pm 30\%$; пульсации напряжения — не более 5 %; полярность напряжения — положительная и отрицательная; длительность возрастания и спада напряжения — 1...5 мкс;

переменного тока с фиксированной частотой: форма напряжения — синусоидальная; частота — соответствует основной частоте сети электропитания; напряжение холостого хода (главный параметр) — (1; 3; 10; 30; 100 В) $\pm 30\%$ (среднеквадратическое значение); коэффициент нелинейных искажений — не более 10 %; сдвиг по фазе моментов включения и выключения напряжения (относительно сети электропитания) — $\pm 5\%$;

переменного тока с изменяющейся частотой: форма напряжения — синусоидальная; частота — от 15 Гц до 150 кГц $\pm 10\%$ (с автоматической перестройкой); скорость автоматической перестройки частоты — не более 0,01 декад/с; шаг при ступенчатой перестройке частоты — не более 10 % от предыдущего значения частоты; напряжение холостого хода (главный параметр) — 0,1...30 В $\pm 10\%$ (среднеквадратическое значение); коэффициент нелинейных искажений — не более 1,0 %;

* Общее несимметричное напряжение — среднее значение напряжения между портом защитного заземления и каждой из линий, подключённых к одному порту электропитания, ввода, вывода или связи.

выходное сопротивление ИГ — $50 \text{ Ом} \pm 10 \%$;
длительность имитируемой помехи: кратковременной — 1 с, длительной — не ограничена.

Устойчивость должна быть обеспечена при подаче испытательных воздействий, имитирующих кратковременные и длительные помехи постоянного тока, переменного тока с фиксированной частотой:

- на линии электропитания постоянного и переменного тока;
- на неэкранированные несимметричные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных;
- на неэкранированные симметричные соединительные линии ввода, вывода, передачи данных;
- на экраны кабелей, соединённые с корпусом испытываемого изделия.

Испытательные воздействия подают через устройства связи, подключённые непосредственно к портам изделия. Параметры элементов каждого устройства связи должны быть выдержаны с такой погрешностью, чтобы подача испытательного напряжения не приводила к появлению недопустимого симметричного напряжения между любыми двумя соединительными линиями, подключёнными к одному порту. Устройства развязки должны располагаться на стороне вспомогательного оборудования, включаться во все линии электропитания и соединительные линии, подлежащие проверке, и обеспечивать ослабление подаваемых испытательных воздействий (общего несимметричного напряжения) не менее чем на 60 дБ.

Изделие подключают к контуру защитного заземления в соответствии с технической документацией. ИГ и устройства связи / развязки соединяют с пластиной заземления или контуром защитного заземления проводами длиной не более 1 м. Входы всех устройств связи / развязки, не подключённые во время проверки к испытательному генератору, заземляют (рис. 4).

При подаче испытательных воздействий на линии электропитания и неэкранированные несимметричные соединительные линии один вывод ИГ заземляют, а другой подключают одновременно ко всем линиям проверяемого порта через устройство связи, имеющее один вход для подключения ИГ, n соединённых с ним резисторов с сопротивлением $100 \times n \text{ Ом} \pm 1 \%$ каждый (n — число линий проверяемого порта) и n конденсаторов ёмкостью $1 \text{ мкФ} \pm 1 \%$, последовательно включённых с резисторами, которые замыкают накоротко при имитации помех постоянного тока. В качестве устройств развязки используют дроссели, включённые в каждую линию электропитания, и конденсаторы, включённые со стороны вспомогательного оборудования между каждыми двумя линиями электропитания и между каждой линией и землёй (или линией защитного заземления в кабеле электропитания).

При подаче испытательных воздействий на неэкранированные симметричные соединительные линии один вывод ИГ заземляют, а второй подключают поочередно к каждой симметричной паре линий проверяемого порта через устройство связи, имеющее один вход для подключения ИГ, два соединённых с ним резистора с сопротивлением $100 \times n \text{ Ом} \pm 1 \%$ каждый ($n = 2$ — число одновременно подключаемых линий) и последовательно соединённые с резисторами дроссели с бифилярной обмоткой ($2 \times 38 \text{ мГн}$) и конденсаторы ($4,7 \text{ мкФ}$), которые замыкают накоротко при имитации помех постоянного тока. В качестве устройства развязки используют дроссели с бифилярной обмоткой ($2 \times 38 \text{ мГн}$), которые включают последовательно с каждой из двух линий, образующих пару.

При подаче испытательных воздействий на экраны кабелей один вывод ИГ заземляют, а второй поочередно подключают к экрану в точке на дальнем от изделия конце каждого кабеля (устройства связи / развязки не используют). При испытаниях применяют экранированный кабель, тип и максимальная допускаемая длина которого указаны в технической документации, или подходящий кабель длиной 20 м, если тип и допускаемая длина не указаны.

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 8]. При проведении испытаний ИГ поочередно подключают к каждому устройству связи / развязки и проверяют функционирование изделия, подавая испытательные воздействия, имитирующие длительные и кратковременные (в течение 1 с) помехи постоянного тока (положительной и отрицательной полярности), переменного тока с фиксированной частотой (50 Гц) и помехи переменного тока при плавном или ступенчатом изменении частоты в диапазоне от 15 Гц до 150 кГц.

Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными полями [3], [8], [24], могут создаваться радиопередающими устройствами, излучающими в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц. Приёмниками помех являются цепи электропитания и соединительные вводы, вывода, передачи данных линии, подключённые к портам изделия, которые могут рассматриваться как пассивные приёмные антенны.

Параметры испытательных воздействий, имитирующих помехи, определяют на выходе устройства связи / развязки, предназначенном для подключения испытываемого изделия: форма немодулированного напряжения — синусоидальная; коэффициент нелинейных искажений — не более 15 %; немодулированное напряжение (главный параметр) — (1; 3; 10 В) $\pm 25 \%$ (среднеквадратическое значение); частота — от 150 кГц до 80 МГц; скорость автоматической перестройки частоты — не более 0,0015 декад/с;

шаг при ступенчатой перестройке частоты — не более 1 % от частоты предыдущего шага;
выходное сопротивление ИГ — $50 \text{ Ом} \pm 10 \%$;
амплитудная модуляция выходного напряжения: форма модулирующего сигнала — синусоидальная; глубина модуляции — $80 \% \pm 5 \%$; частота модулирующего сигнала — $1 \text{ кГц} \pm 10 \%$.

Устойчивость должна быть обеспечена при подаче испытательных воздействий:

- на линии электропитания постоянного и переменного тока;
- на неэкранированные несимметричные соединительные линии;
- на неэкранированные симметричные соединительные линии;
- на экраны кабелей, соединённые с корпусом испытываемого изделия.

Испытательные воздействия подают через устройства связи, подключённые к соответствующим портам изделия. В качестве устройства развязки используют низкочастотный и высокочастотный дроссели с общей индуктивностью не менее 280 мкГн (на частоте 150 кГц), включённые последовательно в каждую цепь электропитания или соединительную линию, а также конденсаторы ёмкостью 47 нФ, шунтирующие каждую из них на землю.

Для обеспечения воспроизводимости результатов до начала испытаний непосредственно на рабочем месте проводят калибровку устройств связи / развязки и установку требуемого уровня испытательного воздействия. При

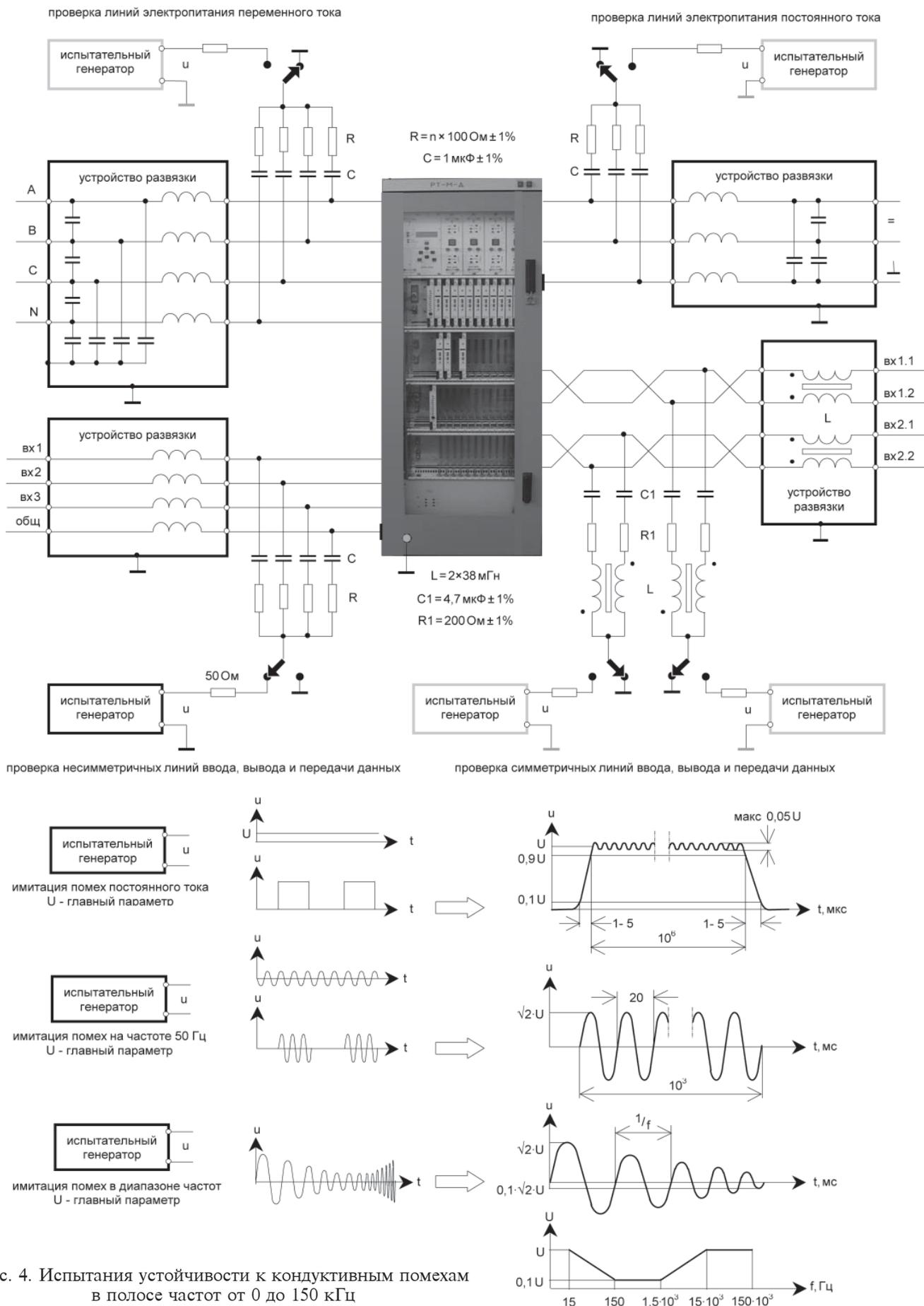


Рис. 4. Испытания устойчивости к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц

калибровке вывод устройства связи / развязки, предназначенный для подключения ИГ, соединяют с пластиной заземления через резистор с сопротивлением 50 Ом, а выводы, предназначенные для подключения испытываемого изделия, соединяют между собой и подключают к ним измеритель полных сопротивлений. Модуль полного сопротивления должен быть 150 ± 20 Ом в диапазоне частот от 150 кГц до 26 МГц и от 105 до 210 Ом в диапазоне частот от 26 до 80 МГц. Сопротивление должно находиться в указанных пределах, когда выход устройства связи / развязки, предназначенный для подключения вспомогательного оборудования, не нагружен и когда он заземлён. Для установки требуемого уровня испытательного воздействия выводы устройства связи / развязки, предназначенные для подключения вспомогательного оборудования, объединяют и соединяют с пластиной заземления через резистор с сопротивлением 150 Ом. Подавая немодулированный сигнал от ИГ и изменяя его частоту, контролируют напряжение на соединённых между собой выводах устройство связи / развязки, предназначенных для подключения испытываемого изделия. Фиксируют уровни немодулированного напряжения ИГ, необходимые для того, чтобы получить требуемое значение главного параметра испытательного воздействия на выходе устройства связи / развязки, предназначенном для подключения испытываемого изделия.

Для проведения испытаний изделие устанавливают на изолирующей подставке толщиной $0,1 \pm 0,01$ м над пластиной заземления. Порт заземления соединяют с пластиной заземления через устройство связи / развязки. Во все линии электропитания и соединительные линии, подлежащие проверке, включают устройства связи / развязки, расположив их на пластине заземления на расстоянии 0,1–0,3 м от испытываемого изделия и соединив с ним кабелями, проложенными на высоте от 30 до 50 мм над пластиной заземления. Расстояние по линиям электропитания и соединительным линиям между портами испытываемого изделия и устройствами связи / развязки должно составлять от 0,1 до 0,3 м. Линии, не подлежащие проверке, должны быть отсоединены от соответствующих портов, если это не нарушает возможность проверки изделия, в противном случае к ним должны быть подключены устройства связи / развязки.

Испытательные воздействия подают на линии электропитания, неэкранированные и симметричные соединительные линии через устройства связи / развязки, типовые схемы которых показаны на рис. 5. Входы всех устройств связи / развязки, не подключённых во время проверки к испытательному генератору, соединяют с пластиной заземления через резисторы с сопротивлением 50 Ом. При большом числе линий используют клещи связи, охватывающие все соединительные линии, идущие в одном или нескольких кабелях. Подачу испытательных воздействий на экраны кабелей производят через резистор с сопротивлением 100 Ом (устройства связи / развязки не используют).

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 9]. Модулированное выходное напряжение ИГ поочередно подключают к каждому устройству связи / развязки и проверяют функционирование изделия при плавном или ступенчатом изменении частоты (для каждой частоты устанавливают тот ранее зафиксированный уровень немодулированного напряжения ИГ, который обеспечивает на выходе данного устройства связи / развязки получение главного параметра испытательного воздействия, соответствующего заданной степени жёсткости испытаний).

Помехи от излучаемых радиочастотных электромагнитных полей [3], [5], [21], [30] создаются портативными приёмопередатчиками, стационарными и передвижными радио- и телевизионными передающими устройствами, цифровыми радиотелефонами, а также сварочным оборудованием, тиристорными регуляторами, люминесцентными источниками света.

Испытательные воздействия, имитирующие излучаемое радиочастотное электромагнитное поле, характеризуют следующими параметрами:

немодулированное электромагнитное поле: напряжённость поля (главный параметр) — (1; 3; 10 30 В/м) ± 4 дБ (среднеквадратическое значение); форма изменения напряжённости — синусоидальная; поляризация — горизонтальная и вертикальная; частота — от 80 до 1000 МГц и от 1,4 до 2,0 ГГц, нестабильность частоты — не более 10^{-5} ; скорость автоматической перестройки частоты — не более 0,0015 декад/с; шаг при ступенчатой перестройке частоты — не более 1 % частоты предыдущего шага;

амплитудная модуляция электромагнитного поля: форма модулирующего сигнала — синусоидальная; частота модулирующего сигнала — 1 кГц ± 10 %; глубина модуляции — (80 ± 5) %;

пространственные характеристики электромагнитного поля: размеры плоскости однородного поля* — $1,5 \times 1,5$ м; высота нижней границы плоскости однородного поля — 0,8 м; допускаемая пространственная неоднородность — не более 6 дБ (для 75 % плоскости однородного поля).

Устойчивость должна быть обеспечена при подаче испытательных воздействий непосредственно на порт корпуса изделия и подходящие к нему участки неэкранированных кабелей.

Испытания проводят в полубезэховой камере (рис. 6) — экранированном помещении, стены и потолок которого покрыты радиопоглощающим материалом, а на полу камеры предусмотрена возможность установки перед началом испытаний радиопоглощающего материала. Вспомогательное оборудование размещают вне камеры; во всех линиях электропитания и электрических соединительных линиях, входящих и выходящих из камеры, применяют устройства развязки (помехоподавляющие фильтры) или используют, если возможно, оптическую связь. Испытательные воздействия подают от генератора радиочастотных сигналов с перестраиваемой частотой, снабжённого амплитудным модулятором и усилителем мощности немодулированного и модулированного сигнала (с ручным и автоматическим изменением выходной мощности) через излучающие антенны с линейной поляризацией (биконическую — для диапазона частот от 80 до 300 МГц, логопериодическую — для диапазона частот от 80 до 1000 МГц, рупорную — для частот свыше 1000 МГц).

Для обеспечения воспроизводимости результатов проводят периодическую аттестацию испытательного оборудования. При аттестации контролируют пространственные характеристики немодулированного электромагнитного поля, измеряя его напряжённость с помощью горизонтально и вертикально поляризованной или изотропной измерительной антенны. Напряжённость поля измеряют на каждой частоте при вертикальной и горизонтальной поляризации излучающей антенны. Измерения производят при

* Плоскость однородного поля — гипотетическая вертикальная плоскость, в которой отклонения напряжённости поля от установленного значения находятся в заданных пределах.

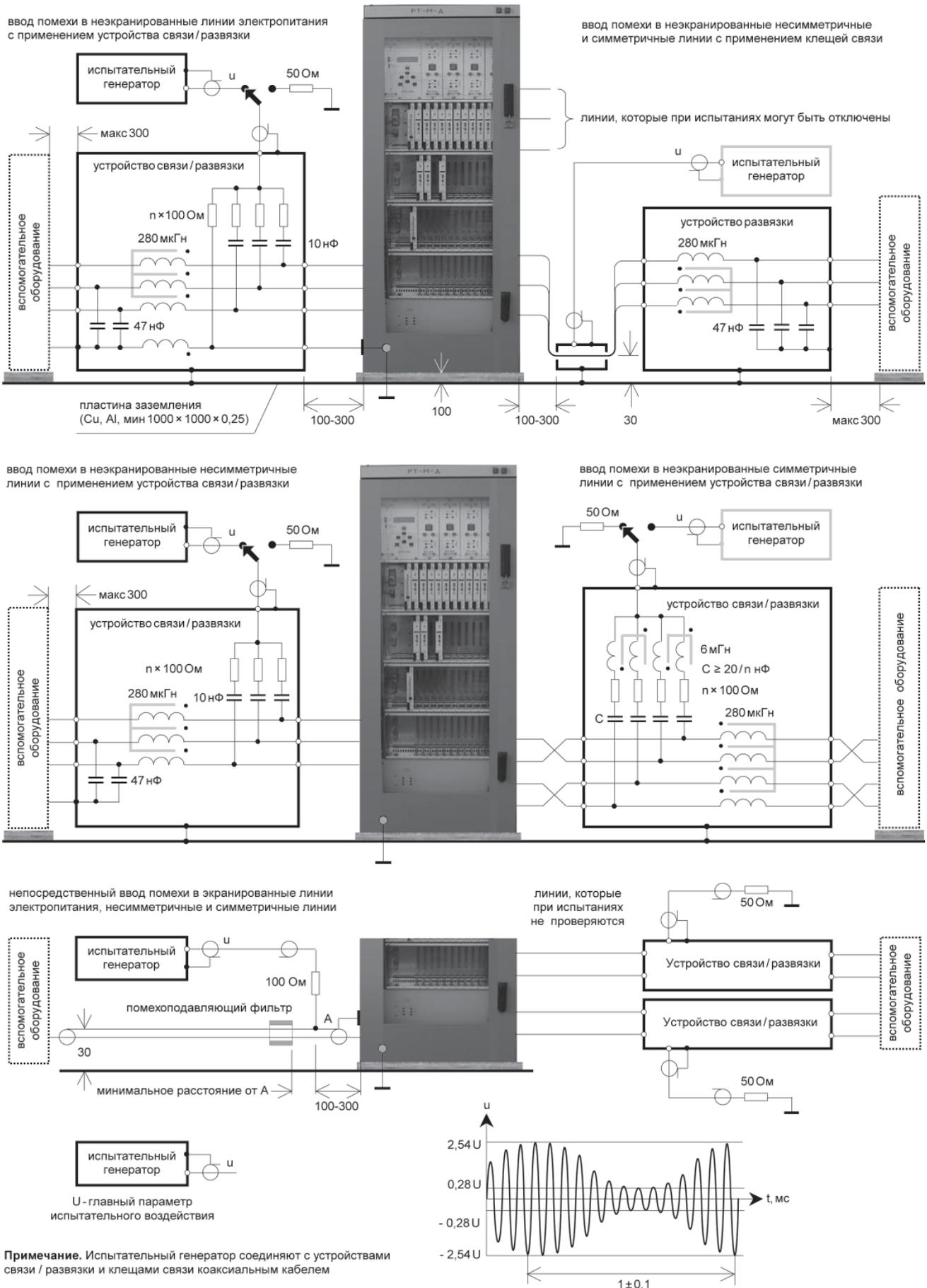


Рис.5. Испытания устойчивости к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями

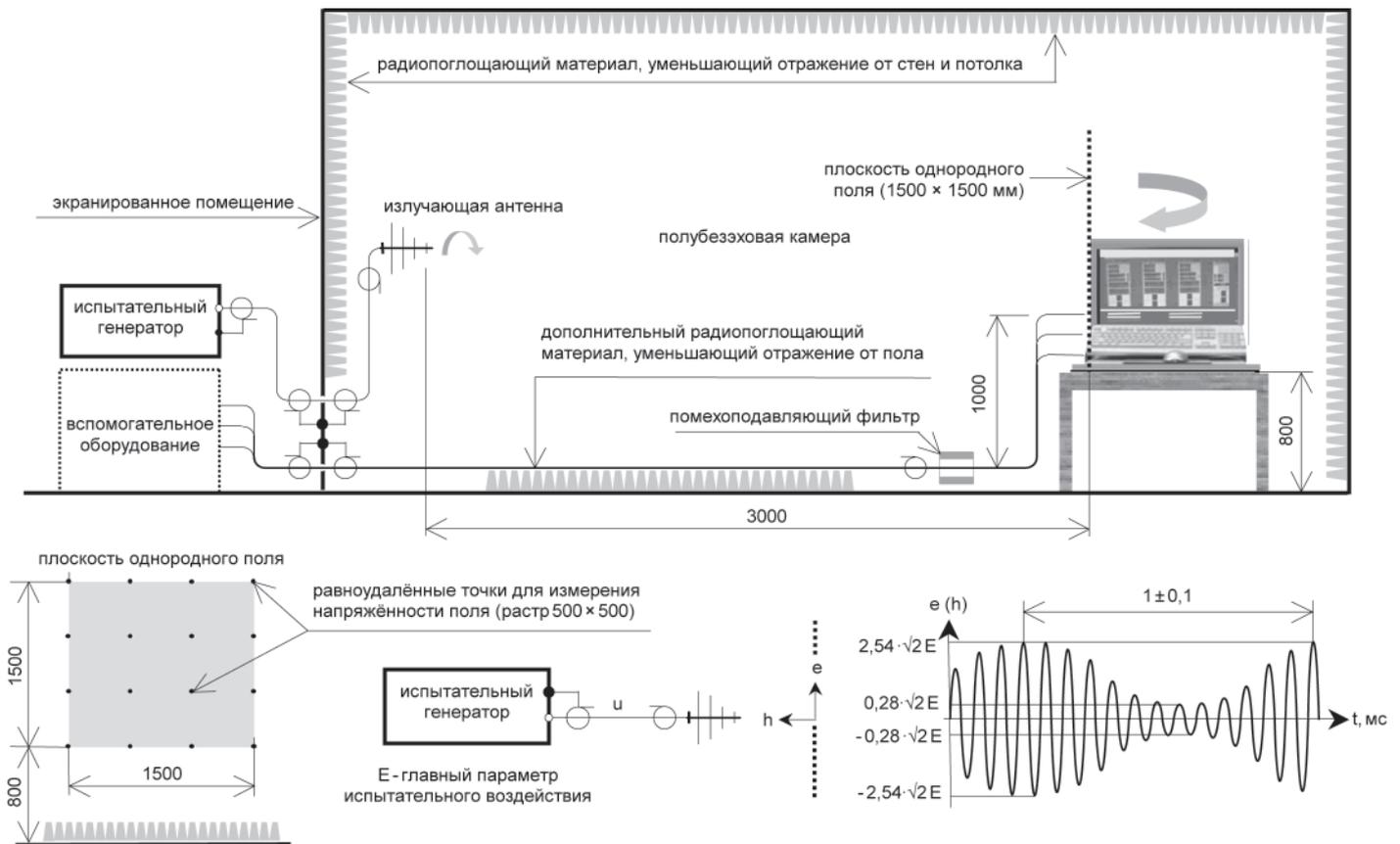


Рис. 6. Испытания устойчивости к помехам от излучаемых радиочастотных электромагнитных полей

одной и той же мощности немодулированного сигнала, подводимого к излучающей антенне, в 16 точках предполагаемой плоскости однородного поля на расстоянии 3 м от антенны. Точки контроля должны образовывать сетку с растром 0,5 м по горизонтали и вертикали и покрывать квадрат $1,5 \times 1,5$ м, нижняя граница которого находится на высоте 0,8 м (рис. 6). Результаты измерений в 4 точках раstra, в которых напряжённость поля имеет наибольшие отклонения от среднего значения, отбрасывают. Поле можно считать однородным, если в оставшихся 12 точках раstra измеренные значения напряженности отличаются друг от друга не более чем на 6 дБ. Выбрав среди них точку с минимальной напряжённостью, изменяют мощность, подводимую к излучающей антенне, добиваясь того, чтобы измеренная в этой точке напряженность немодулированного электромагнитного поля соответствовала главному параметру испытательного воздействия (1; 3; 10; 30 В/м). Фиксируют положение плоскости однородного поля, излучающей антенны и кабелей, а также значения мощности, подводимой к излучающей антенне, необходимые для получения напряженности поля, которая соответствует требуемой степени жёсткости испытаний. Эти данные используют в дальнейшем при проведении испытания любых изделий, лицевые стороны которых, включая участки подходящих к ним кабелей, могут быть полностью покрыты плоскостью однородного поля. При этом следует по возможности точно воспроизводить положения плоскости однородного поля, излучающей антенны и кабелей, зафиксированные при аттестации.

Для проведения испытаний изделие устанавливают на платформе из непроводящего материала высотой 0,8 м так, чтобы одна из его боковых поверхностей совпала с плоско-

стью однородного поля. Если изделие и/или подключённые к нему кабели не могут быть установлены на указанной высоте, их размещают на полу, на изолирующей подставке толщиной 0,1 м, предварительно измерив и зафиксировав напряжённость поля на высоте 0,4 м. Если какая-либо часть поверхности изделия, включая участки подходящих к нему кабелей, которые должны подвергаться испытательным воздействиям, не могут быть полностью покрыты плоскостью однородного поля, должна быть измерена и зафиксирована напряжённость поля в точках, совпадающих с максимальной высотой и поперечными размерами изделия. Заземление изделия выполняют в соответствии с технической документацией. Кабели, подключаемые к изделию, располагают параллельно плоскости однородного поля так, чтобы длина участка, подвергаемого воздействию поля, составляла 1 м. Остальные участки кабелей должны быть экранированы и отделены от испытываемых помехопоглощающими фильтрами, например ферритовыми трубками.

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 10]. Испытания проводят при горизонтальной и вертикальной поляризации электромагнитного поля (при двух положениях излучающей антенны), размещая изделие так, чтобы с плоскостью однородного поля поочередно совпадала каждая из его боковых поверхностей. При каждом положении изделия и излучающей антенны запускают автоматическое (непрерывное или ступенчатое) изменение частоты несущей модулированного электромагнитного поля (от минимальной до максимальной в границах заданного диапазона). Мощность, подводимую к излучающей антенне, корректируют на

основании данных, полученных при аттестации испытательного оборудования, так, чтобы на каждой частоте напряжённость поля соответствовала заданной степени жёсткости испытаний.

Помехи, вызванные электростатическими разрядами [3], [4], [19], [20], могут возникать вследствие импульсных разрядов статического электричества при прямом воздействии персонала (например, прикосновении непосредственно к порту корпуса изделия) и непрямом воздействии (прикосновении к объектам, расположенным вблизи изделия).

Испытательные воздействия, имитирующие электростатические разряды, — импульсы тока, возникающие при контактном или воздушном разряде заряженного накопительного конденсатора, ёмкость которого соответствует ёмкости человеческого тела, через резистор, имитирующий электрическое сопротивление человека:

ёмкость накопительного конденсатора — $150 \text{ пФ} \pm 10 \%$;

заряд накопительного конденсатора: напряжение (главный параметр) при контактном разряде (2; 4; 6; 8 кВ) $\pm 5 \%$; напряжение (главный параметр) при воздушном разряде (2; 4; 8; 15 кВ) $\pm 5 \%$; полярность — положительная и отрицательная; время удержания заряда (на уровне более 90 %) — не менее 5 с;

сопротивление разрядного резистора — $330 \text{ Ом} \pm 10 \%$;

импульс тока при контактном разряде (в зависимости от заряда накопительного конденсатора): время нарастания — от 0,7 до 1,0 нс; ток первого максимума — (7,5; 15;

22,5; 30 А) $\pm 10 \%$; ток через 30 нс — (4; 8; 12; 16 А) $\pm 30 \%$; ток через 60 нс — (2; 4; 6; 8 А) $\pm 30 \%$.

Источник испытательных воздействий (испытательный генератор) должен иметь в цепи разрядного электрода вакуумное реле или иной ключ, замыкание которого обеспечивает одиночный контактный разряд накопительного конденсатора через разрядный резистор на металлическую поверхность. При воздушном разряде цепь разрядного электрода постоянно соединена с накопительным конденсатором и разрядным резистором (разряд происходит при быстром приближении разрядного электрода к окрашенной металлической поверхности). Испытательные воздействия подаются с помощью стандартного наконечника разрядного электрода. Для обеспечения воспроизводимости результатов периодически проверяют параметры импульса разрядного тока при помощи измерительных приборов с полосой пропускания не менее 1000 МГц, используя конструкцию датчика тока, регламентированную стандартом [19], [20].

Устойчивость должна быть обеспечена при подаче прямых испытательных воздействий на наружные металлические поверхности изделия (не менее 5 точек на лицевой стороне, включая ручки, замки, вентиляционные решётки, элементы ручного управления, индикаторы и т. п., и не менее 3 точек на задней и боковых сторонах), а также на крепёжные винты, корпуса электрических соединителей, присоединённые к ним экраны кабелей и те точки, расположенные внутри изделия, которые могут оказаться

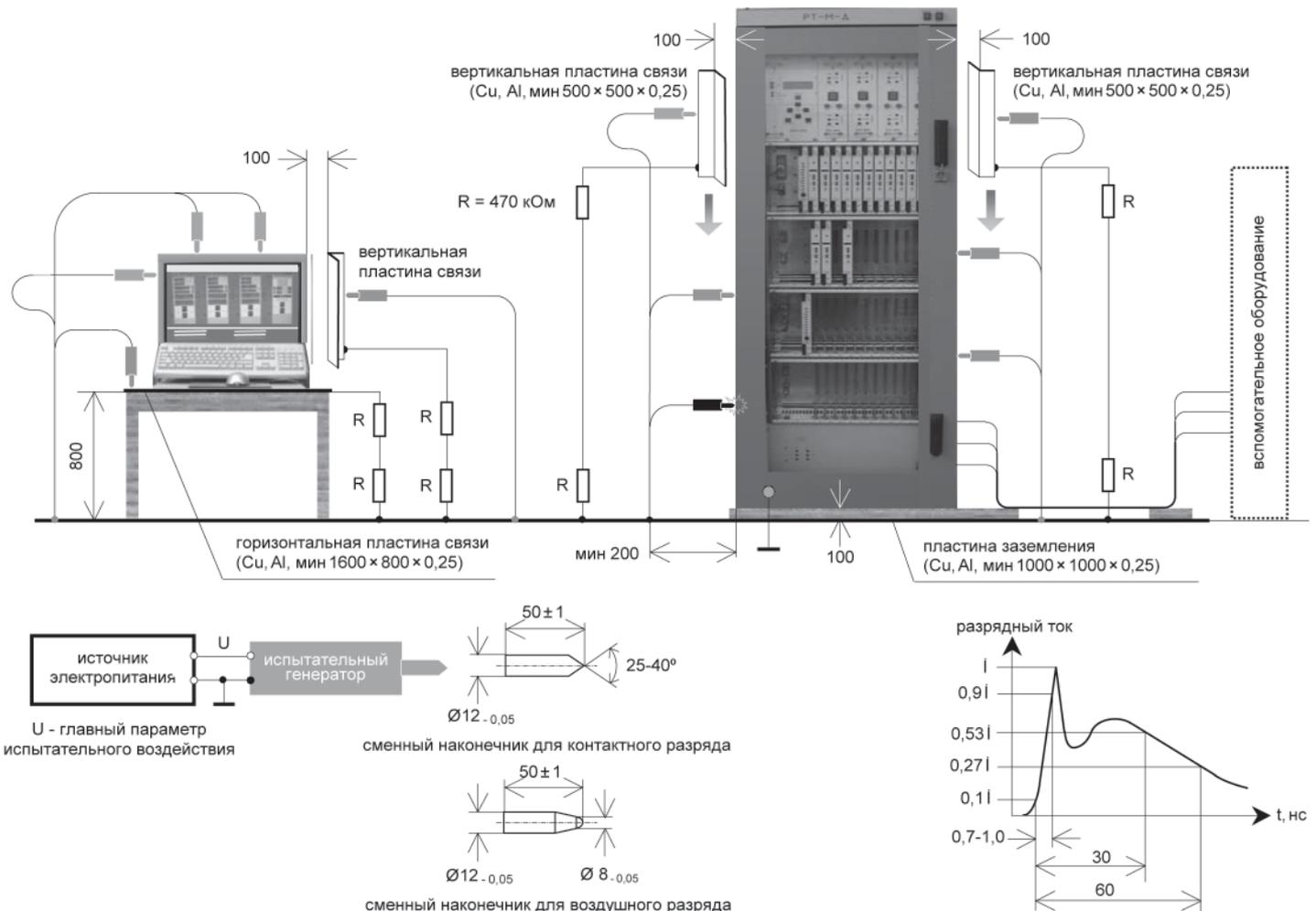


Рис.7. Испытания устойчивости к помехам, вызванным электростатическими разрядами

доступными для прикосновения персонала при эксплуатации, техническом обслуживании и / или восстановлении. Если объекты, доступные для прикосновения, могут оказаться рядом с изделием, предусматривают также подачу непрямых испытательных воздействий на вертикальную пластину связи, расположенную на расстоянии 0,1 м от наружной боковой поверхности изделия, и на горизонтальную пластину связи, расположенную под настольным изделием.

Для проведения испытаний напольное изделие устанавливают на изолирующей подставке толщиной $0,1 \pm 0,01$ м над пластиной заземления, настольное — на изолирующей прокладке толщиной 0,5 мм над горизонтальной пластиной связи, расположенной на высоте 0,8 м над пластиной заземления (рис. 7). Порт заземления испытываемого изделия и пластину заземления соединяют с контуром защитного заземления испытательной лаборатории, вертикальную и горизонтальную пластины связи подключают к пластине заземления проводами, имеющими на каждом конце резисторы с сопротивлением 470 Ом. Корпус ИГ соединяют с пластиной заземления изолированным проводом длиной не более 2—3 м, расположенным на расстоянии не менее 0,2 м от изделия.

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия определяют по [2, табл. 11]. Испытания проводят, поочерёдно подавая не менее 10 прямых контактных или воздушных разрядов положительной и отрицательной полярности на каждую из контролируемых точек изделия и не менее 10 непрямых контактных разрядов положительной и отрицательной полярности на каждую пластину связи (в центре её вертикального ребра). Испытательные воздействия на окрашенные металлические поверхности изделия подают методом воздушного разряда, на неокрашенные поверхности и пластины связи — методом контактного разряда. Наконечник разрядного электрода располагают перпендикулярно к поверхности, на которую производится разряд. Интервал между разрядами должен быть не менее 1 с.

На месте эксплуатации могут быть проведены дополнительные испытания устойчивости к электростатическим разрядам. В этом случае пластину заземления располагают на полу на расстоянии примерно 0,1 м от изделия и соединяют с опорным узлом системы защитного заземления или с портом заземления проверяемого изделия.

Помехи от магнитных полей могут возникать:

при протекании токов промышленной частоты по близкорасположенным токопроводам низковольтных распределительных сетей и линиям электропередачи — в течение неограниченного времени, а также при повреждении силового электрооборудования — до срабатывания защитных устройств (магнитное поле частоты сети длительное и кратковременное, соответственно) [3], [9], [15], [25];

при переключениях высоковольтных линий, ударах молний в находящиеся вблизи металлические конструкции или шины заземления, используемые в качестве молниеотводов, а также в результате переходных процессов, возникающих при повреждении силовых распределительных сетей низкого, среднего и высокого напряжения и авариях силового электронного оборудования (импульсное магнитное поле) [3], [10], [17], [26];

при переключении высоковольтных шинопроводов разъединителями на электрических подстанциях среднего и высокого напряжения (затухающее колебательное магнитное поле) [11], [16], [27].

Испытательные воздействия, имитирующие помехи, — магнитное поле внутри одновитковой индукционной катушки, которое создаётся протекающим по ней током испытательного генератора. Напряженности поля в центре катушки (главный параметр) при имитации:

длительного магнитного поля частоты сети — (1; 3; 10; 30; 100 А/м) ± 20 % (среднеквадратическое значение);

кратковременного магнитного поля частоты сети — (100; 300; 1000 А/м) ± 20 % (среднеквадратическое значение);

импульсного магнитного поля — (100; 300; 1000 А/м) ± 20 % (пиковое значение);

затухающего колебательного магнитного поля — (10; 30; 100 А/м) ± 20 % (пиковое значение).

Параметры тока на выходе ИГ в режиме короткого замыкания (при подключении индукционной катушки):

при создании магнитного поля частоты сети: форма — синусоидальная; частота — соответствует основной частоте сети электропитания; ток (среднеквадратическое значение): длительный — от 1,2 до 120 А, кратковременный (1—3 с) — от 120 до 1200 А; коэффициент нелинейных искажений — менее 8 %;

при создании импульсного магнитного поля: форма импульса — треугольная; ток (пиковое значение) — от 120 до 1200 А; время нарастания тока (между 10 и 90 %) — $6,4 \text{ мкс} \pm 20$ %; длительность импульса тока (на уровне 50 %) — $16 \text{ мкс} \pm 20$ %; полярность импульсов — положительная и отрицательная; сдвиг по фазе по отношению к напряжению питающей сети переменного тока — от 0 до 360° ; запуск — от внешнего сигнала;

при создании затухающего колебательного магнитного поля: форма импульса — затухающая синусоида; ток (пиковое значение) — от 12 до 120 А; частота колебаний — 0,1 и 1,0 МГц ± 10 %; затухание после трёх — шести периодов — 50 %; частота повторения посылок тока — не менее 40 с^{-1} при частоте колебаний 0,1 МГц, 400 с^{-1} при частоте 1 МГц.

Индукционная катушка должна обеспечить создание магнитного поля с заданной напряжённостью и иметь такие размеры, чтобы при расположении плоскости катушки в любой из трёх взаимно перпендикулярных плоскостей имелась возможность размещать изделие в середине её рабочего объёма, в котором неравномерность магнитного поля не превышает ± 3 дБ. Коэффициент индукционной катушки определяют как отношение напряжённости магнитного поля в центре катушки к току, протекающему по катушке. Индукционные катушки выполняют из меди, алюминия или другого проводящего немагнитного материала толщиной не более 10 мм. Стандартные одновитковые катушки прямоугольной формы для испытания настольных изделий имеют размеры 1×1 м (рабочий объём $0,6 \times 0,6 \times 0,5$ м, индуктивность 2,5 мкГн, коэффициент индукционной катушки 0,87), для напольных изделий — $1 \times 2,6$ м (рабочий объём $0,6 \times 0,6 \times 2,0$ м, индуктивность 6 мкГн, коэффициент индукционной катушки 0,66). Рабочий объём с допускаемой неравномерностью для стандартных катушек может быть определён также по характеристикам распределения магнитного поля, например, приведенным в [15]—[17]. Для испытаний при воздействии поля в трёх ортогональных плоскостях могут быть применены разные индукционные катушки. Расстояние от любого проводника катушки до ближайшей наружной поверхности испытываемого изделия должно быть не менее 20 % длины каждой стороны катушки. При больших размерах изделия используют две одновитковые катушки, плоскости которых разнесены на 0,6 или 0,8 м.

Чтобы обеспечить воспроизводимость результатов испытаний, предварительно проверяют характеристики ИГ при подключении индукционной катушки, которая будет использоваться во время испытаний, и выполняют калибровку индукционной катушки. Калибровку следует проводить без испытываемого изделия, при удалении катушки от стен помещения не менее 1 м и отсутствии вблизи магнитных материалов. Напряжённость магнитного поля измеряют с помощью датчика, установленного в геометрическом центре катушки и ориентированного вдоль вектора напряжённости поля. Коэффициент индукционной катушки, полученный при калибровке, используется во время испытаний для расчёта значения тока, который обеспечивает получение требуемой напряжённости магнитного поля.

Для проведения испытаний изделие устанавливают на изолирующей подставке толщиной $0,1 \pm 0,01$ м над пластиной заземления, соединённой с контуром защитного заземления (рис. 8). Порт заземления испытываемого изделия соединяют с пластиной заземления. Соединительные кабели отделяют от пластины заземления изолирующими прокладками толщиной $0,1 \pm 0,01$ м. Длина неэкранированных кабелей, подвергающихся воздействию магнитного поля, не должна превышать 1 м. При более длинных кабелях применяют устройства развязки: для линий электропитания — сетевые фильтры («эквиваленты сети»), для остальных линий — последовательно соединённые резистор и конденсатор, обеспечивающие входное сопротивление 50 Ом. Устройства развязки подключают к плоскости заземления и соединяют с испытываемым изделием кабелями длиной 1 м. ИГ должен находиться на расстоянии не менее 3 м от индукционной катушки и подключаться скрученными проводами. При вертикальном расположении индукционной катушки один из её вертикальных проводников может быть подключен у основания непосредственно к пластине заземления (в этом случае выводы испытательного генератора подключаются к основанию другого вертикального проводника и к пластине заземления).

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия для каждого вида испытаний определяют по [2, табл. 12 — 14], требуемый ток ИГ рассчитывают с учётом найденного при калибровке коэффициента индукционной катушки. Испытания проводят при поочерёдном воздействии на порт корпуса магнитных полей, векторы напряжённости которых направлены перпендикулярно каждой из боковых сторон изделия (или только той стороне, которая соответствует максимальной восприимчивости изделия к магнитному полю). Чтобы охватить проверкой всю поверхность изделия в случае, когда его размеры превышают рабочий объём катушки, её сдвигают по вертикали и / или горизонтали с шагом, не превышающим 50 % длины наименьшей стороны катушки.

Устойчивость к длительному магнитному полю частоты сети проверяют в течение времени, достаточного для оценки правильности функционирования изделия, воздействие кратковременного магнитного поля осуществляют отдельными посылками длительностью 1–3 с. При испытании устойчивости к воздействию импульсного магнитного поля в каждом из положений индукционной катушки подают не менее 5 испытательных воздействий, создаваемых током положительной и отрицательной полярности. Устойчивость к воздействию затухающего колебательного магнитного поля проверяют при двух частотах колебаний (0,1 и 1,0 МГц) и

длительности воздействия $2 \text{ с} \pm 10 \%$, с интервалом между подачей испытательных воздействий не менее 10 с.

Помехи в линиях заземления [3], [30] могут возникать при коммутационных процессах в силовых цепях, авариях и пробоях изоляции в системах электроснабжения, повреждениях силового электрооборудования, а также при ударах молний. Испытанию подвергают изделия, имеющие один или несколько портов сигнального заземления*, гальванически разделённых или соединённых с портом защитного заземления.

Испытательные воздействия определяют на выходе испытательного генератора:

имитирующего микросекундные импульсные помехи: форма импульса тока — треугольная; полярность импульсов — положительная и отрицательная; ток на нагрузке 0,1 Ом (главный параметр) — (50; 100; 150; 200 А) $\pm 20 \%$ (пиковое значение); время нарастания тока (между 10 и 90 %) — $4 \text{ мкс} \pm 30 \%$; длительность импульса тока (на уровне 50 %) — $300 \text{ мкс} \pm 20 \%$; выходное сопротивление ИГ — $2 \text{ Ом} \pm 30 \%$;

имитирующего кратковременные синусоидальные помехи: форма посылки тока — прерывающаяся синусоида; частота — соответствует частоте сети электропитания; ток на нагрузке 0,1 Ом (главный параметр) — (50; 100; 150; 200 А) $\pm 20 \%$ (среднеквадратическое значение); длительность посылки — $3 \text{ с} \pm 10 \%$; выходное сопротивление ИГ — $15 \text{ мОм} \pm 50 \%$.

Испытательный генератор должен иметь незаземлённый выход.

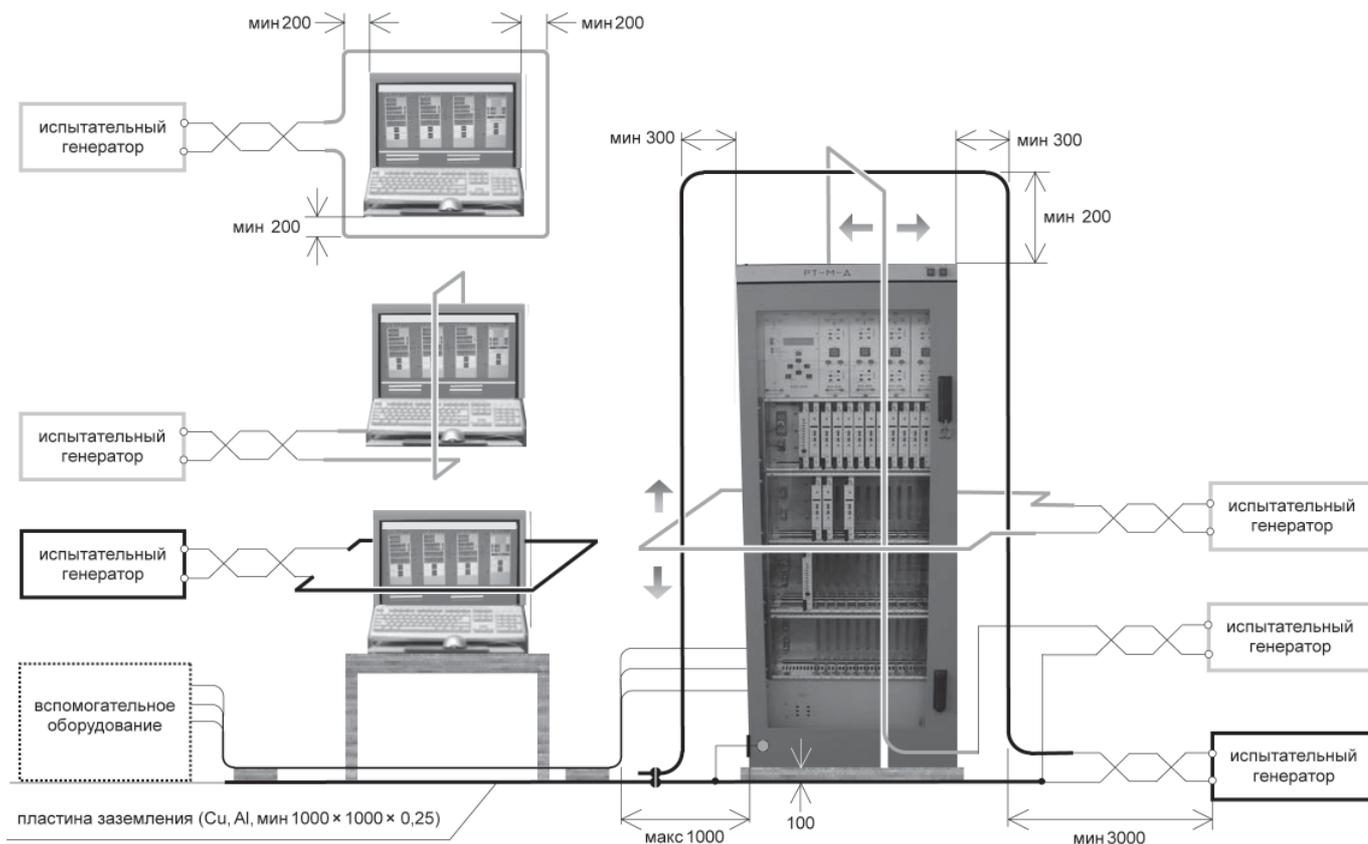
Для проведения испытаний (рис. 9) все порты защитного и сигнального заземления подключают к имитаторам опорных узлов системы заземления в соответствии с указаниями, приведёнными в документации; длина соединительных шин не должна превышать 3 м.

При проверке изделия, у которого порты защитного и сигнального заземления гальванически разделены и подключены отдельными шинами к разным опорным узлам или к общему опорному узлу заземления, выводы ИГ подключают поочерёдно между портом защитного заземления и каждым портом сигнального заземления. Если в проверяемом изделии объединённые порты сигнального и защитного заземления соединены одной шиной с общим опорным узлом заземления, выводы ИГ подключают сначала между этими объединёнными портами и опорным узлом заземления, затем — между портами заземления каждой пары изделий, которые соединены друг с другом линиями ввода, вывода и / или передачи данных.

Степень жёсткости испытаний задают, руководствуясь [2, табл. 2], значение главного параметра испытательного воздействия для каждого вида испытаний определяют по [2, табл. 7]. Испытания проводят, подавая от ИГ, имитирующего микросекундные импульсные помехи, не менее 10 импульсов тока положительной и отрицательной полярности, затем от ИГ, имитирующего кратковременные синусоидальные помехи, — не менее 10 посылок тока длительностью 3 с каждая. Интервал между импульсами и между посылками тока должен составлять не менее 1 мин.

На месте эксплуатации могут быть проведены дополнительные испытания устойчивости к помехам в реальных цепях заземления.

* Порт сигнального заземления — порт, обеспечивающий возможность подключения гальванически развязанных цепей ввода, вывода и/или передачи данных непосредственно к опорному узлу заземления в помещении, где эксплуатируется изделие.



рабочие объемы стандартных индукционных катушек

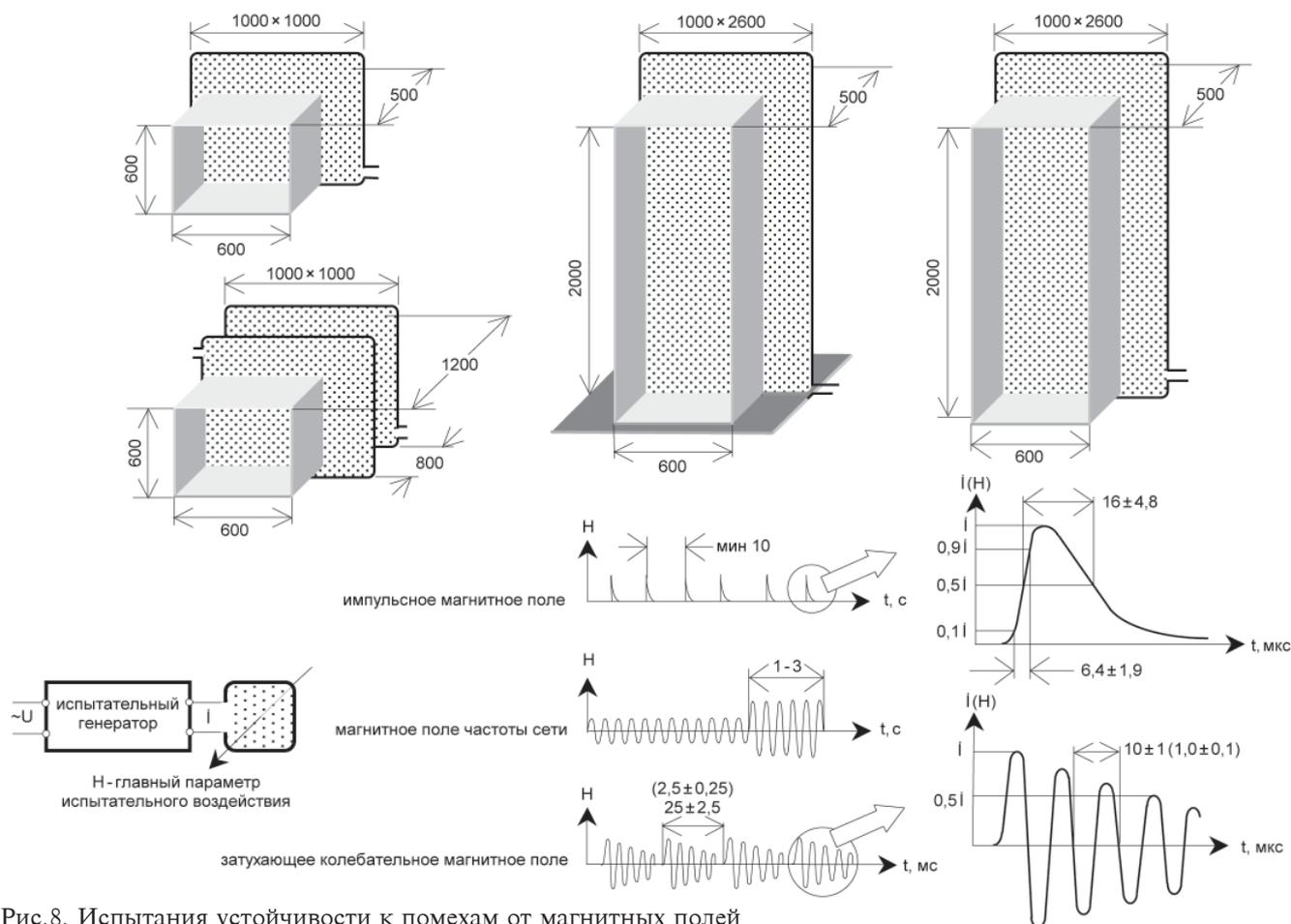
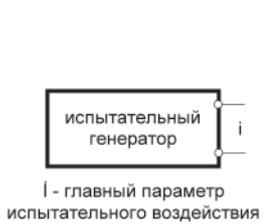
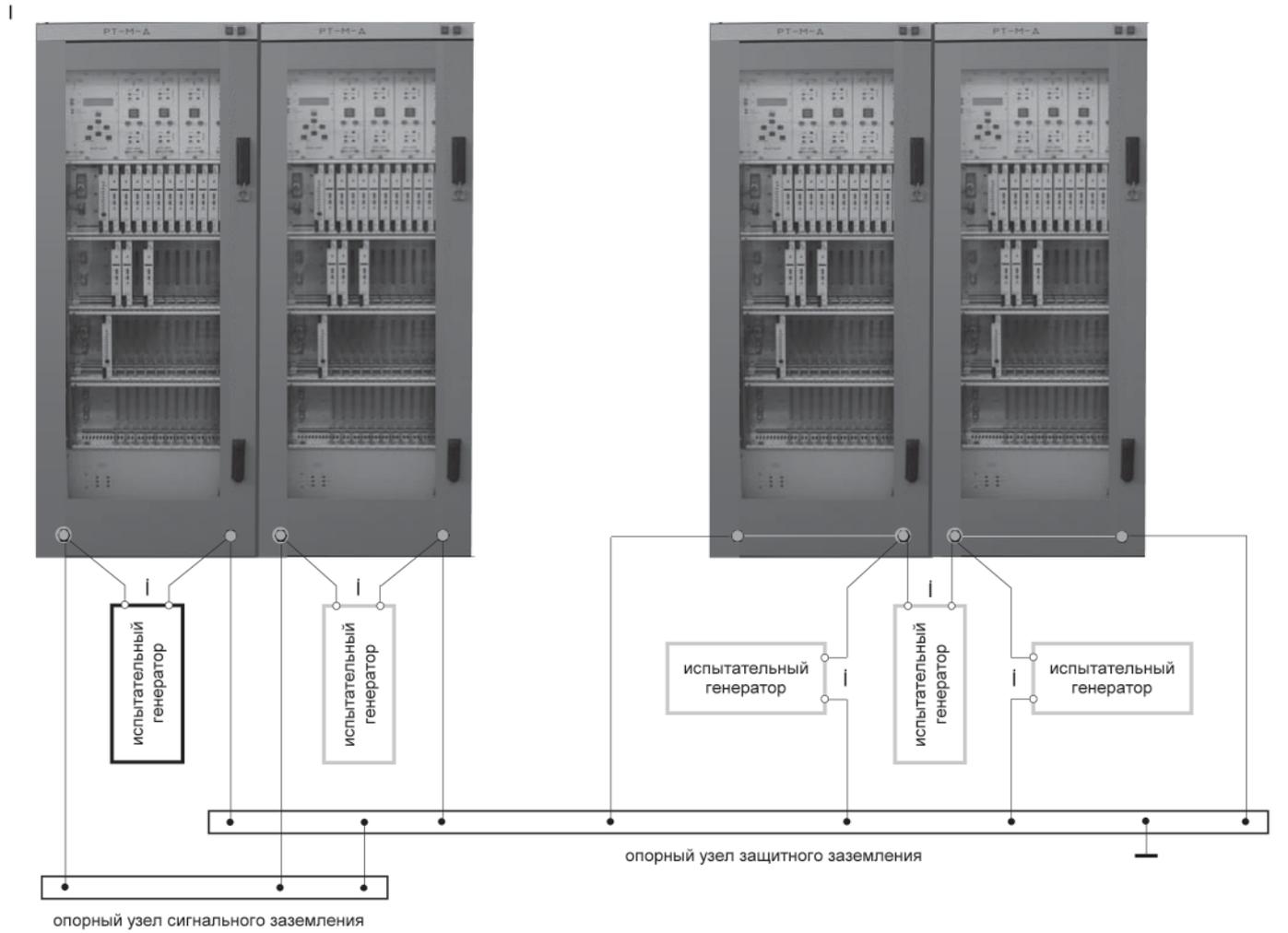


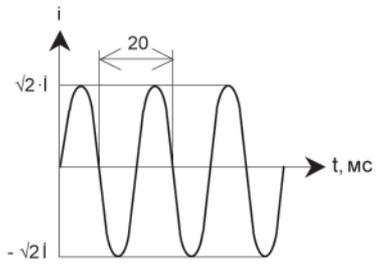
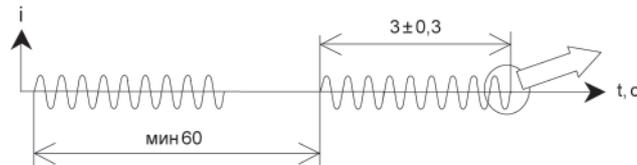
Рис. 8. Испытания устойчивости к помехам от магнитных полей

порты сигнального и защитного заземления разделены

порты сигнального и защитного заземления соединены



кратковременная синусоидальная помеха



микросекундная импульсная помеха

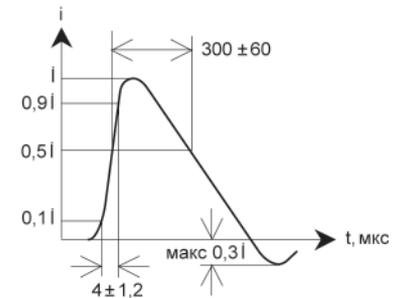


Рис.9. Испытания устойчивости к помехам в линиях заземления

Заключение

Как указано в [2], с целью использования мирового и отечественного опыта по нормированию, обеспечению и оценке безопасности информационных и управляющих систем и гармонизации с требованиями международных стандартов предусмотрена разработка новой редакции норм и правил НП 306.5.02/3.035, в которой необходимо внимание будет уделено вопросам нормирования и оценки помехоустойчивости компонентов, важных для безопасности АЭС. Нормирование требований к помехоустойчивости принято сопровождать обязательным указанием правил и методов оценки соответствия изделий этим требованиям.

Общие правила, которыми следует руководствоваться при планировании, проведении испытаний и оценке помехоустойчивости, приведены в первой статье [2] из серии публикаций, посвящённых электромагнитной совместимости компонентов ИУС (технических средств автоматизации и эксплуатационно-автономных составных частей программно-технических комплексов).

В данной статье, продолжающей эту серию, обобщены и систематизированы методы испытаний помехоустойчивости, которые регламентированы в международных и национальных стандартах по электромагнитной совместимости. Охвачены все виды электромагнитных помех (кроме связанных с изменениями параметров электропитания), предусмотренные действующей редакцией норм и правил НП 306.5.02/3.035 [3], а также колебательные затухающие помехи, кондуктивные помехи в полосе частот от 0 до 150 кГц и кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными полями (в соответствии с проектом международного стандарта [14], который устанавливает требования к испытаниям электромагнитной совместимости информационных и управляющих систем, важных для безопасности атомных электростанций).

Поскольку изменения параметров электропитания в международной практике отождествляют с электромагнитными возмущениями, которые могут вызывать помехи в работе оборудования, далее будут рассмотрены методы испытаний устойчивости компонентов ИУС к таким помехам.

Приведенные методы ориентированы на проведение испытаний в аккредитованных испытательных лабораториях и / или на площадке разработчика (изготовителя, поставщика) изделий.

Для некоторых видов помех приводятся также методы экспериментальной проверки (испытаний) помехоустойчивости на месте эксплуатации изделий, если такая возможность предусмотрена соответствующими стандартами.

Проверка на месте эксплуатации (во время предпусковых испытаний и / или технического обслуживания) может проводиться по согласованию эксплуатирующей организации с разработчиком (изготовителем, поставщиком); при этом следует иметь в виду, что в международных стандартах специально оговорена предпочтительность проверок, проводимых в испытательных лабораториях, по сравнению с испытаниями помехоустойчивости изделий после их установки на месте эксплуатации.

В отношении остальных видов помех, для которых стандарты не предусматривают проверку во время эксплуатации, сохраняется актуальность разработки и нормирования специальных правил оценки электромагнитной совместимости в процессе квалификации действующего оборудования АЭС.

Литература

1. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы / М. А. Ястребенецкий, В. Н. Васильченко, С. В. Виноградская и др.; Под ред. М. А. Ястребенецкого. — К.: Техника, 2004. — 472 с.
2. Розен Ю. В. Электромагнитная совместимость компонентов информационных и управляющих систем (1): правила нормирования и оценки помехоустойчивости // Ядерная и радиационная безопасность. — 2007. — № 2.
3. НП 306.5.02/3.0352000. Требования по ядерной и радиационной безопасности к информационным и управляющим системам, важным для безопасности атомных станций.
4. IEC 61000-4-2:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 2: Electrostatic discharge immunity test. (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 2: Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам).
5. IEC 61000-4-3:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 3: Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 3: Испытания на устойчивость к излучённому радиочастотному электромагнитному полю).
6. IEC 61000-4-4:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 4: Electrical fast transient / burst immunity test. Basic EMS Publication (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 4: Испытания на устойчивость к быстрым переходным процессам и всплескам. Базовая публикация по ЭМС).
7. IEC 61000-4-5:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 5: Surge immunity test (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 5: Испытания на устойчивость к всплескам напряжения).
8. IEC 61000-4-6:2003. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 6: Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 6: Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными полями).
9. IEC 61000-4-8:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 8: Power frequency magnetic field immunity test (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 8: Испытания на устойчивость к магнитным полям частоты питания).
10. IEC 61000-4-9:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 9: Pulse magnetic field immunity test (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 9: Испытания на устойчивость к импульсным магнитным полям).
11. IEC 61000-4-10:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 10: Damped oscillatory magnetic field immunity (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 10: Устойчивость к затухающему колебательному магнитному полю).
12. IEC 61000-4-12:2001. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 12: Oscillatory waves immunity test (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 12: Испытания на устойчивость к колебательным волнам).
13. IEC 61000-4-16:2002. Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 4: Testing and measurement techniques. — Section 16: Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz (Электромагнитная совместимость (ЭМС). — Ч. 4: Методы испытаний и измерений. — Разд. 16: Испытания на устойчивость к кондуктивным помехам в виде несимметричного напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц).
14. IEC 62003 Ed.4/CD. Nuclear Power Plants. — Instrumentation and control systems important to safety. — Requirements for

electromagnetic compatibility testing (Атомные электростанции. — Информационные и управляющие системы, важные для безопасности. — Требования к испытаниям электромагнитной совместимости).

15. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги і методи випробувань.

16. ДСТУ 2625-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до загасаючого магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань.

17. ДСТУ 2626-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань.

18. ГОСТ 2915691. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Технические требования и методы испытаний.

19. ГОСТ 2919191. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Технические требования и методы испытаний.

20. ГОСТ Р 51317.4.2-99 (МЭК 61000-4-2-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.

21. ГОСТ Р 51317.4.3-99 (МЭК 61000-4-3-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний.

22. ГОСТ Р 51317.4.4-99 (МЭК 61000-4-4-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний.

23. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросе-

кундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний.

24. ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний.

25. ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 61000-4-8-93). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний.

26. ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 61000-4-9-93). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний.

27. ГОСТ Р 50652-94 (МЭК 1000-4-10-93). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к затухающему колебательному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний.

28. ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12-97). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний.

29. ГОСТ Р 51317.4.16-2000 (МЭК 61000-4-16-98). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц. Требования и методы испытаний.

30. ГОСТ Р 50746-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных электростанций. Требования и методы испытаний.

31. Ястребенецкий М. А., Розен Ю. В. О классификации по безопасности информационных и управляющих систем и их компонентов // Ядерная и радиационная безопасность. — 2004. — № 4.