

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Оценивание низковольтного комплектного устройства для обеспечения безопасности в области электробезопасности и электромагнитной совместимости в электроустановках

Обучающийся

У.В. Маслова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор, В.В. Вахнина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Оценка продукции требованиям соответствия, как необходимый этап обеспечения безопасности.....	8
1.1 Основные характеристики объекта исследования.....	8
1.2 Сертификация, как направление подтверждения безопасности продукции.....	11
1.3 Законодательное регулирование в области обеспечения безопасности.....	15
1.4 Выбор количества образцов для испытаний.....	20
2 Совершенствование экспериментальной базы для обеспечения сертификационных испытаний.....	23
2.1 Требования к испытательной сертификационной лаборатории.....	23
2.2 Необходимые требования к работающему персоналу лаборатории	24
2.3 Необходимые требования к условиям окружающей среды в испытательной лаборатории.....	25
2.4 Требования к обращению с испытуемыми изделиями.....	26
2.5 Основные требования к испытательному оборудованию.....	26
2.6 Разработка требования к качеству проводимых испытаний.....	27
2.7 Выбор и обоснование конструкции радиобезэховой камеры	34
2.8 Совершенствование методики аттестации безэховой камеры для испытаний на помехоэмиссию.....	49
2.9 Совершенствование методики аттестации безэховой камеры для проведения сертификационных испытаний на восприимчивость к электромагнитному излучению.....	58
3 Экспериментальные исследования низковольтного комплектного устройства.....	64
3.1 Исследование низковольтного комплектного устройства в рамках требований ТР ТС 004/2011.....	64

3.2 Исследование низковольтного комплектного устройства на излучаемую помехоэмиссию.....	72
3.3 Исследование низковольтного комплектного устройства на восприимчивость к электромагнитному излучению.....	77
Заключение.....	84
Список используемой литературы и используемых источников.....	85

Введение

В настоящее время в промышленности широкое распространение получили низковольтные комплектные устройства (НКУ). Они применяются для управления различными комплексами, распределения электрической энергии, ее трансформации, защиты оборудования, измерения различных электрических параметров, сигнализации и передачи данных. Все современные электротехнические системы и комплексы включают в себя НКУ соответствующего назначения. Поэтому они должны обеспечивать безотказную работоспособность и штатное функционирование в широком диапазоне внешних многофакторных воздействий. Достаточно большое количество низковольтных комплектных устройств изготавливаются для применения в индивидуальном исполнении под конкретную техническую задачу. Документация, в соответствии с которой производитель изготавливает НКУ, полностью соответствует требованиям заказчика в части габаритных размеров, состава и внутренней компоновки приборов и устройств, а также электрических соединений [1, 3, 16]. В эксплуатации на НКУ воздействуют различные внешние факторы, а также само НКУ может влиять на другие системы. Поэтому вопросы технической совместимости, надежности и безопасности являются актуальными. Для их решения необходимо осуществлять комплексный подход, включающий в себя все стадии разработки, моделирования, проектирования, испытания, изготовления и сертификации. Только в этом случае можно достичь требуемых повторяющихся показателей, стабильных в течении длительного времени. Важную часть всего процесса, предшествующего выпуску продукции на свободный рынок, являются испытания. Их задачей является подтверждение правильности заложенных и реализованных решений, гарантирующих соответствие требованиям. В общем подходе испытания разделяются на стадию, где происходит оценка изделия с целью ее доработки. Как правило это этап опытно-конструкторских работ [17], [18], [32]. На следующей стадии

изготовитель производит внутреннее подтверждение соответствия изделия требованиям для начала подготовки производства. Это соответствует этапу завершения разработок. Третьей вехой является проведение сертификационных испытаний, где на базе законодательных основ дается разрешение на серийный выпуск и реализацию. Сертификация продукции является необходимым инструментом обеспечения и поддержания ее качества. В этой сфере происходит законодательное регулирование. В соответствии с государственным законом «О сертификации продукции и услуг», сертификация является обязательным этапом подтверждения регламентированным требованиям и производится независимым сторонним органом [15]. Именно такой подход является объективным, так как для достижения коммерческих целей производитель может применять преднамеренное искажение внутренних тестов, исключая из открыто предоставляемых данных отрицательные результаты, подменяя их положительными. Поэтому односторонний подход не дает полную гарантию обеспечения безопасности и качества продукции. Несмотря на то, что сертификация продукции в России имеет многолетнюю историю, в этой области достаточно много нерешенных вопросов. Большая их часть касается обеспечения полноты, достаточности и достоверности испытаний. Здесь так же можно выделить несколько особо важных направлений, в которых необходимо совершенствоваться. В большинстве случаев это затрагивает методологии тестирования, которые зачастую не поспевают за техническим прогрессом. Касательно НКУ, которые работают в комплексном взаимодействии с электроустановками, расширяется их матрица функционирования. Для полноценной их проверки на соответствие требованиям безопасности и качества необходимо разрабатывать новые стратегии, совершенствовать экспериментальную базу и методы испытаний. Соответственно это должно своевременно отражаться в нормативно-технической документации.

С учетом высокой интеграции электротехнических систем в

промышленности, важными направлениями развития испытаний являются подтверждение безопасности и обеспечение электромагнитной совместимости НКУ, что в обобщенно и отражено в технических регламентах ТС 004/2011 и ТС 020/2011. Отсюда вытекает актуальность тематики, которая состоит в совершенствовании сертификационных процедур для обеспечения выпуска на рынок качественной и безопасной продукции.

Объект исследования: сертификационные лаборатории испытательных центров.

Предмет исследования: методы для обеспечения сертификационных испытаний низковольтных комплектных устройств.

Целью диссертационного исследования является – совершенствование экспериментальной базы и методов сертификационных испытаний для оценки безопасности и обеспечение электромагнитной совместимости низковольтных комплектных устройств.

Гипотеза исследования состоит в том, что усовершенствованные сертификационные процедуры позволят более полно и качественно давать оценку НКУ по результатам испытаний.

Для достижения поставленной цели в магистерской работе планируется решить следующие задачи:

- проанализировать существующее законодательное регулирование в области обеспечения безопасности и электромагнитной совместимости;
- разработка мероприятий по совершенствованию экспериментальной базы для обеспечения качества проведения сертификационных испытаний;
- усовершенствовать применяемые методы испытаний низковольтных комплектных устройств;
- провести экспериментальные исследования низковольтного комплектного устройства.

Основные положения, выносимые на защиту:

- требования к лаборатории для повышения качества оценки и достоверности результатов сертификационных испытаний;
- методики межкамерных сравнений и периодического контроля соответствия требуемым параметрам испытательного оборудования;
- методики аттестации безэховой камеры для проведения испытаний на электромагнитную совместимость;
- усовершенствованные методы подтверждения безопасности и обеспечение электромагнитной совместимости низковольтных комплектных устройств.

Научная новизна исследования: усовершенствована комплексная методология, применяемая в сертификационных испытаниях для оценки безопасности и обеспечение электромагнитной совместимости низковольтных комплектных устройств

Практическая значимость исследования: повышение качества, достоверности и оценки результатов сертификационных испытаний.

По теме диссертации опубликовано 2 научные статьи в сборнике IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Тула, 2023 г.).

Структура и объём работы.

Структура: введение, 3 раздела, заключение, список используемой литературы и используемых источников, включающий 42 наименования. Объем: 88 страниц машинописного текста.

1 Оценка продукции требованиям соответствия, как необходимый этап обеспечения безопасности

1.1 Основные характеристики объекта исследования

Объектом исследования работы является низковольтное комплектное устройство (НКУ) «Шкаф контроллеров телемеханики ИНБРЭС-ШТМ», производитель ООО «ИНБРЭС». Область применения НКУ охватывает предприятия энергетической промышленности. Оно входит в состав программно-технического комплекса (ПТК) «ИНБРЭС» и является составной частью системы управления, которая осуществляет управление и обработку, отображение, регистрацию, хранение, передачу и предоставление информации на мониторы для обеспечения оперативной работы персонала энергетической отрасли, в частности электрических станций и подстанций 6-35/110-750 кВ. На НКУ возлагаются следующие функции [13]: сбор, промежуточное хранение, обработки и передачи данных с электрических приборов учёта передаваемой/принимаемой активной и реактивной энергии, а также мощности с линией питания 0,22 кВ и выше [1].

Общий вид НКУ представлен на рисунке 1.

Основные технические характеристики, заявленные производителем:

- а) габаритные размеры: 0,6×0,6×0,25 м;
- б) масса: 100 кг;
- в) питание: для однофазного переменного тока 220 В с частотой 50 Гц допустимый интервал напряжений 176 - 242 В;
- г) мощность: 200 Вт;
- д) климатическое исполнение (два вида): УХЛ3.1 и УХЛ4;
- е) диапазон рабочих температур окружающей воздушной среды:
 - 1) для УХЛ4: от +1 до +40⁰С,
 - 2) для УХЛ3.1: от -25 до +45⁰С;
- ж) допустимая относительная влажность воздуха при +25⁰С:

- 1) для УХЛ4: 98%,
- 2) для УХЛ3.1: 80%.

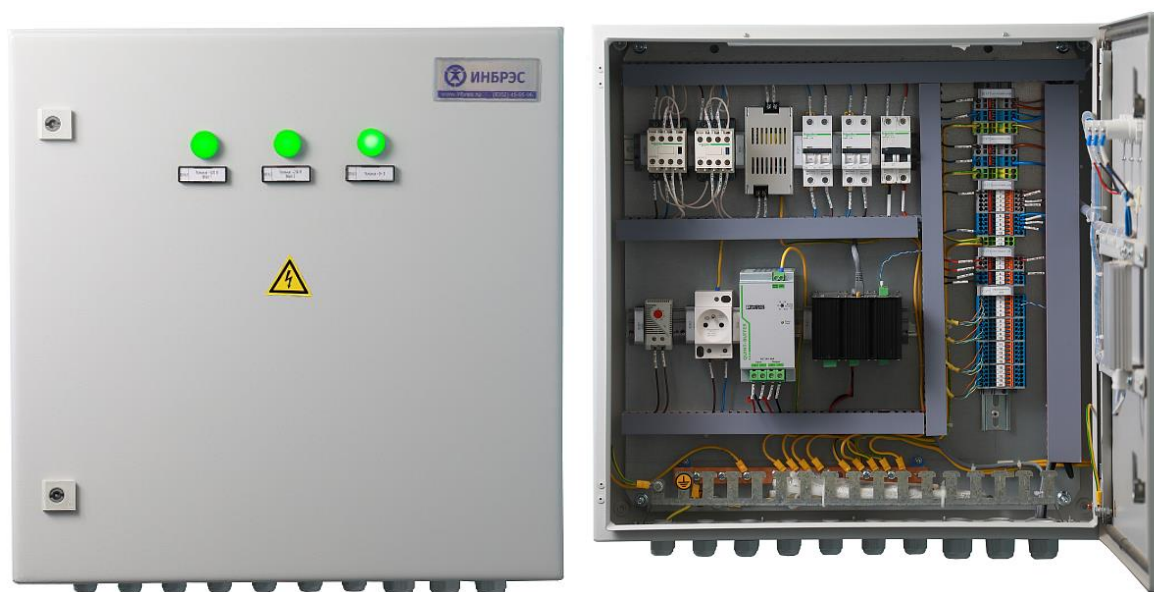


Рисунок 1 – Общий вид объекта исследований: шкаф контроллеров телемеханики ИНБРЭС-ШТМ

Электрическая аппаратура, установленная в шкафу, обеспечивает [4], [28], [29], [30], [31]:

- сбор информации с измерительных устройств, в частности трансформаторов тока и напряжения;
- сбора диагностической информации о текущем состоянии энергетического оборудования;
- управление аппаратами, обеспечивающими электрическую коммутацию;
- обмен информацией между устройствами по стандартным интерфейсам Ethernet 100Base-TX, RS422/485 с использованием стандартных протоколов обмена данными ModBus RTU, МЭК 60870-5-101/103/104 [2];
- обработка и анализ получаемой информации в режиме реального времени;
- хранение информации;

- наличие приемника сигналов точного времени от навигационных систем ГЛОНАСС и GPS;
- выдача сигналов точного времени и синхронизация с внешними устройствами по точному времени по стандартным промышленным протоколам NTP/SNTP, IRIG-B, 1PPS, NMEA;
- обмен информационными текущими данными, в том числе и аварийными с информационно-диагностическими комплексами различных уровней контрольно-диспетчерского управления [3];
- наличие встроенной диагностики и контроля программно-технических средств;
- наличие защиты информации от преднамеренного несанкционированного доступа;
- возможность установки энергонезависимых часов до 24 часов работы с синхронизацией приемника сигналов точного времени;
- возможность установки опции автоматического сбора показаний приборов учета о изменении потребления электроэнергии;
- автоматическое ведение записи в журнал событий с синхронизацией по времени в соответствии с регламентированными требованиями стандарта отрасли ПАО «Россети» «Устройства сбора и передачи данных. Требования к информационной модели» [4];
- автоматический поиск различных приборов учета при наличии от производителей драйверов и интерфейсов, а также протоколов обмена данными, для последующего их подключения в общую комплексную схему опроса;
- возможность установки опции для снятия показаний со всех подключённых зарегистрированных информационно-измерительных комплексов;
- наличие в базовой комплектации встроенного высоконадежного WEB-сервера;

- возможность установки опции передачи полученных данных в формате XML всем заинтересованным клиентам рынка электроэнергетики;
- возможность установки опции длительного срока хранения информации (не менее 3,5 лет).

1.2 Сертификация, как направление подтверждения безопасности продукции

В соответствии со стандартом ГОСТ ISO/IEC 17067-2015 [5] под сертификацией продукции понимают процедуру ее подтверждения соответствия определенным установленным нормативным требованиям. Сертификация осуществляется специализированными аккредитованными в соответствии с ISO/IEC 17025 организациями [38].

Требования, в соответствии с которыми, проводится подтверждение соответствия продукции, прописываются в международных или национальных стандартах, а также могут быть изложены в специализированных отраслевых нормативных документах [19].

Имеется альтернативное определение сертификации продукции, в соответствии с которым, это утвержденная процедура или алгоритм оценки соответствия, демонстрирующая соответствие заданным требованиям. К требованиям может быть отнесен один или группа параметров, таких как безопасность, надежность, долговечность, функциональная совместимость и способность к заданному времени эксплуатации [36].

Сертифицированная продукция, как правило, направлена на содействие конкурентоспособности, честному доступу на рынок и ее пригодности на различных уровнях, включающих национальный, региональный и международный [35].

Основная цель сертификации - это удовлетворение потребностей потребителей за счет придания им уверенности в том, что требования на продукцию выполнены в полном необходимом объеме [22], [23].

При сертификации применяется семь основных схем, которые классифицируются по типам следующим образом: 1a, 1b, 2, 3, 4, 5 и 6.

По первой схеме типа 1a образцы продукции подвергаются процедуре определения. Причем в зависимости от выборки образцов может быть как один, так и несколько штук. Документ в виде регламентированного сертификата соответствия выдается на данный конкретный вид продукции. В нем подробно описываются основные характеристики. Особенностью данного подхода является то, что последующие выпускаемые серийные изделия запрещено рассматривать как прошедшие подтверждение соответствия, выполненное сертификационным органом. Сертифицированные образцы служат репрезентативными для последующих серийно выпускаемых изделий, в случае если производитель заявляет, что они произведены согласно сертифицированному типу. Сертификационный орган имеет право предоставить производителю применять сертификат типа или иное выданное свидетельство о подтверждении соответствия продукции в качестве основы для заявления производителя, о том, что более поздняя выпущенная серийная продукция соответствует установленным регламентированным требованиям.

По второй схеме типа 1 b проводится сертификация всей отобранной и определенной партии заявляемой продукции. Отбор на испытания определяется на основании утвержденных критериев, среди которых основным является однородность изделий в партии. При положительном результате определения и окончательной проверки, то вся продукция представленной партии считается прошедшей сертификацию. Далее продукция, при условии оговоренной схемы, подлежит маркировке знаком соответствия [14].

Третья схема «2» подразумевает инспекционный контроль. Его суть заключается в периодическом независимом отборе случайных образцов продукции, выпущенной на рынок. В процессе сертификации определяют их характеристики и параметры. Критерием положительного прохождения

является условие идентичности результатам первоначального подтверждения соответствия продукции [16].

Несмотря на то, что данная схема позволяет проконтролировать соответствие продукции в течении длительного времени, но ее недостатками является значительные трудозатраты. Однако основным достоинством является защита потребителя. Если в процессе выпуска нарушена технология, и выявленные критические несоответствия, то контролирующий орган вправе ограничить, до выполнения всех корректирующих действий, поступление продукции на рынок [18].

Схема типа 3 характеризуется тем, что в процессе периодических инспекционных проверок производится отбор образцов продукции непосредственно на производственном месте. Затем производится анализ и проверки характеристик и параметров и их сравнение с первоначальными сертифицированными образцами. Этот процесс направлен на периодическую оценку технологии процесса производства продукции [17].

Недостатком данной схемы является слабая корреляция воздействия канала распределения на соответствие продукции. Имеется вероятность того, что при выявлении серьезных отклонений от норм будут найдены пути решения возникших проблем уже после того, как продукция массово распространится на рынке.

Схема «Тип 4» подразумевает систематический периодический отбор образцов продукции как на самом производства, так или на рынке. Оценка и проверка их характеристик предполагают схожесть, в рамках установленных допусков, с первоначальными образцами. Иными словами, производится периодическая оценка процесса производства инспекционным контролем.

Основным достоинством данной схемы является то, что она позволяет выявить воздействие канала распределения на соответствие производимой продукции. Кроме того, схема обеспечивает предпродажный механизм выявления, идентификации, локализации и устранения серьезных несоответствий [20].

Схема «Тип 5» достаточно схож со схемой типа 4. Аналогично процедура по данной схеме включает систематический периодический отбор образцов продукции как на самом производства, так или на рынке. Оценка и проверка их характеристик предполагают схожесть, в рамках установленных допусков, с первоначальными образцами. Отличием является:

- наличие периодического оценивания процесса производства;
- проведение полного аудита системы менеджмента;
- совокупность периодического оценивания процесса производства и проведение полного аудита системы менеджмента;

Объем выполнения проводимого инспекционного контроля в зависимости от ситуации может различаться.

Схема «Тип 6» распространена для случаев сертификации услуг и процессов, т.е. применяется для оценки нематериальных продуктов. В этом случае функция определения не ограничивается оценкой нематериальных элементов. В качестве примера можно привести результативность применяемых организацией процедур, несвоевременность действия или быстроту реагирования принятия решений руководства различных рангов. Но в тоже время материальные элементы сертифицируемой услуги могут подкреплять свидетельство адекватности различных процессов. Например, проверка чистоты транспортных средств для обеспечения надлежащего качества перевозок пассажиров [21].

Касательно процессов, ситуация схожая. Как пример, функции определения для процессов сварки может включать проведение полномасштабных испытаний и проверки образцов сварных соединений.

Сертификация с проведением инспекции по схеме «Тип 6» включает в обязательном порядке систематические периодические аудиты системы менеджмента и систематическое периодическое оценивание услуги/услуг и/или процесса/процессов.

В соответствии с описанием критериев сертификации, представленное НКУ адекватно аттестовать по схеме типа 1.

1.3 Законодательное регулирование в области обеспечения безопасности

В рамках проведения сертификации объект исследования попадает под действия двум техническим регламентам таможенного союза: ТР 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» [33] и ТР 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств» [34].

Технический регламент 004/2011 охватывает область на применения выпускаемое в обращение на таможенной территории Союза низковольтное оборудование [22].

В соответствии с определением по регламенту к низковольтному оборудованию относятся все электрооборудование, используемое при номинальном напряжении:

- переменного тока в диапазоне 50 - 1000 В;
- постоянного тока в диапазоне 75 - 1500 В.

Регламент определяет общие технические требования для обеспечения защиты жизни и здоровья человека, имущества, а также предупреждения действий, которые могут ввести в заблуждение или неполное информирование потребителей относительно его назначения и безопасности [23].

В соответствии с требованиями безопасности технологии разработки оборудования должны быть такими, чтобы при применении оборудования в соответствии с техническим назначением и выполнении требований к монтажу, эксплуатации и хранению в заявленные периоды времени, перевозке и техническому обслуживанию это оборудование обеспечивало:

- заданный требованиями уровень защищенности от поражения электрическим током;
- исключение риска появления повышенных температур, разрядных процессов или электромагнитных излучений, приводящих к появлению всевозможных опасностей;

- гарантированный уровень степени защиты для исключения травм от всех частей низковольтного оборудования;
- гарантированный уровень степени защиты от опасностей, связанных с неэлектрическими эффектами, возникающими при использовании низковольтного оборудования, в частности вызванных различными химическими, физическими, биологическими и другими факторами [27];
- гарантированный уровень защитной электрической изоляции;
- гарантированный уровень механической износостойкости;
- гарантированный уровень невосприимчивости к внешним воздействиям немеханического характера, при заданных в требованиях на эксплуатацию, климатических условиях среды;
- исключение опасного риска при критических режимах: перегрузках, авариях, отказах, вызываемых влиянием различных как внутренних, так и внешних факторов;
- исключение опасного риска при подключении НКУ или их монтаже.

НКУ должно разрабатываться таким образом, чтобы оно не было источником появления пожара при нормальных, а также аварийных режимах работы. Потребителю для нормальной эксплуатации должен быть предоставлен весь необходимый уровень технической документации для безопасного применения НКУ с областью его применения и назначения [28].

Для однозначной идентификации НКУ его наименование и обозначение, а также базовые, основные параметры и характеристики, определяющие безопасность, товарный знак производителя, страны, в которой разработано и выпущено НКУ, должны быть нанесены на доступные части ЕКУ для нормальной его идентификации. Кроме этого, наименование производителя и его фирменный товарный знак, название и обозначение НКУ должны быть также нанесены на упаковку.

В случае невозможно нанесения на корпус НКУ сведений, определяющих его однозначную идентификацию, то они должны наноситься в

прилагаемой к оборудованию документации. В тоже время наименование производителя и его фирменный товарный знак, и другие важные сведения должны наноситься на упаковку [30].

Маркировка НКУ в обязательном порядке должна быть разборчивой для чтения без применения специальных оптических средств и нанесена на в доступном для осмотра месте.

Документы по эксплуатации к НКУ должны содержать следующую информацию:

- о назначении изделия;
- основные технические характеристики;
- правила безопасного использования и эксплуатации;
- условия хранения, транспортировки, эксплуатации и продажи;
- сведения о мерах, которые необходимо предпринять в случае обнаружении неисправности НКУ;
- наименование и адрес производителя изделия или импортера, а также достаточно полную информацию для осуществления контактов с ними;
- дату изготовления НКУ.

Техническая документация выполняется на государственном русском языке, а также на государственных языках стран, на территории которых реализуется выпускаемая продукция. Единицы измерения приводятся в международной системе единого измерения СИ [29].

При обязательном выполнении всех описанных требований безопасности или выполнением регламентированных нормативной документацией требований, включенных в общий перечень межгосударственных, а также международных нормативных документов обеспечивает соответствие НКУ рассматриваемому техническому регламенту. При отсутствии регламентирующей нормативной документации применяются внутренние государственные стандарты, и в результате их применения в добровольном порядке обеспечивается соблюдение требований ТР 004/2011.

Методы тестирования НКУ устанавливаются в нормативную

документацию, в частности в стандартах, включенных в перечень международных и региональных стандартов [33].

Технический регламент 020/2011 определяет соответствие требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС), выпускаемые в обращение на таможенной территории Союза и устанавливает требования по ЭМС ТС для обеспечения защиты жизни и здоровья людей и их имущества, а также не допущения действий, вводящих в заблуждение потребителей ТС.

ТС выпускается в обращение на рынке при его подтверждении соответствия техническому регламенту. В случае если ТС, соответствие которого не было подтверждено техническими требованиями рассматриваемого ТР, не маркируется утвержденным единым знаком обращения продукции и соответственно не допускается к применению в обращение на территории таможенного союза.

В соответствии с техническим регламентом НКУ должно разрабатываться и производиться так, чтобы при его эксплуатации по техническому назначению, а также выполнению технических требований к установке, использованию, перемещению, транспортировке и регламентному техническому обслуживанию:

- электромагнитные помехи, генерируемые ТС, не превышали регламентированных уровней, обеспечивающих нормальную работоспособность средств связи и других ТС в соответствии с их функциональным назначением;
- ТС имело уровень помехоустойчивости к электромагнитным воздействиям, обеспечивающий его нормальную работоспособность в той электромагнитной обстановке, для функционирования в которой оно предназначено.

Различные типы электромагнитных помех, которые могут создаваться ТС или воздействовать на него.

Кондуктивные электромагнитные помехи, спектр которых сосредоточен

в низкочастотной области:

- нестабильность напряжения питания электрической сети;
- искажения нормальной формы синусоидального сигнала напряжения электропитания;
- несимметрия уровней и фаз напряжений в трехфазных цепях электроснабжения;
- колебания переменного и постоянного напряжения электропитания;
- провалы, прерывания и выбросы переменного и постоянного напряжения в цепях электропитания;
- отклонения частоты сигнала в цепях электроснабжения;
- уровней напряжения сигналов, передаваемых в цепях электропитания;
- постоянные уровни составляющих в цепях переменного электропитания;
- наведенные электромагнитным воздействием низкочастотные помехи напряжения.

Кондуктивные электромагнитные помехи, включая промышленные радиопомехи, распространяющиеся в высокочастотной области спектра:

- сигналы напряжения или тока, имеющие вид непрерывных синусоидальных колебаний;
- сигналы напряжения или тока, представляющие собой сложные переходные процессы, имеющие вид аperiodического или колебательного характера.

Излучаемые в высокочастотной области спектра электромагнитные помехи:

- электрические электромагнитные помехи;
- электромагнитные помехи, создаваемые синусоидальными колебаниями или различного характера переходными процессами.

Электростатические разрядные процессы.

Соответствие НКУ ТР 020/2011 обеспечивается выполнением его требований по ЭМС непосредственно либо выполнением технических

требований нормативных документов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований данного ТР.

Методы тестирования НКУ устанавливаются в нормативных документах, включенных в перечень международных и региональных стандартов. При их отсутствии применяются государственные стандарты, в которых отражаются методы испытаний, а также требования к отбору образцов, необходимые для оценки соответствия НКУ технического регулирования [32].

1.4 Выбор количества образцов для испытаний

В предельном случае с целью полного контроля выпускаемой продукции необходимо проводить полное тестирование всех образцов. В то же время очевидно, что в условиях реальной действительности это произвести невозможно, т.к. весь процесс является затратным. Возникает вопрос выбора необходимого количества образцов. В общем случае данный процесс является вероятностным. При случайной выборке для испытаний из партии, содержащей N изделий, причем M из которых не соответствуют заявленным техническим требованиям, k образцов, вероятность того, что в ней будет n не удовлетворяющих заявленным характеристикам ($n \leq k$) равна

$$P(A) = \frac{C_M^n \cdot C_{N-M}^{k-n}}{C_N^k}. \quad (1)$$

Очевидно, при большой выборке получается достаточный объем данных для статистического анализа и обработки результатов. Но в реальной ситуации лаборатория при выборе количества тестируемых образцов может руководствоваться требованиями ГОСТ Р 51320-99 [6]. Согласно данному нормативному документу, для проведения испытаний производится случайная выборка из уже имеющейся партии новой выпущенной продукции.

Если для оценки результатов применяется нецентральное t -распределение, то при проведении периодических, а также типовых испытаниях, выбирается как минимум пять изделий. В случае использования биномиального распределения, отбирается семь и более образцов.

В ряде случаев при приемочных, периодических или типовых испытаниях количество отбираемых для тестирования образцов может быть уменьшено до одного, но увеличивается частота проверок за некоторый взятый период времени.

На момент создания опытной партии выбирают 2 % от общего количества, но если изготовлено более трех образцов, то выбирают как минимум три. И испытывают все при условии изготовления трех и менее образцов изделий.

В части вопросов, касающихся электромагнитной совместимости (ЭМС) при испытании изделий, создающих кратковременные электромагнитные помехи, как, например, автомобильный электростартер, достаточно выбрать один образец.

Для сертификационных испытаний применяют несколько иные критерии. По требованиям отбираются не менее пяти образцов. Но в особых случаях по согласованию и решению органов по сертификации разрешается представлять на тесты четыре или три изделия, что является минимальным условием для статистической оценки. Если выпуск ограничен одним образцом, например, система спецзаказа, то соответственно, он и проходит сертификационные испытания.

Возникает важный вопрос – в каком состоянии должны находиться отбираемые образцы? Должны ли они быть с некоторой минимальной наработкой или иметь какой-то более-менее ресурс? Данный вопрос вызван из следующих соображений. С одной стороны, очевидно, что совершенно новое изделие будет находиться в стадии приработки. Наглядным примером является коллекторный электродвигатель, у которого не притерлись щетки коллектора и поэтому из-за конкретных особенностей данное новое изделие

может не проходить ЭМС испытания. Но в дальнейшей эксплуатации при определенной наработке и притирке оно будет соответствовать требованиям. С другой стороны, известны ряд наглядных примеров, когда новое изделие проходит испытания по требованиям, но в процессе даже его гарантийной эксплуатации, характеристики ухудшаются, и оно уже перестает соответствовать заявленным требованиям эффектов, механический износ и как следствие появление люфтов и т.п.

Исходя из практического опыта, можно сформулировать дополнительный критерий при отборе образцов на испытания: для обеспечения полномасштабной оценки продукции, на испытания следует предоставлять помимо новых изделий, как минимум по одному образцу с наработкой, соответствующей одной и двум третям от заявленного ресурса.

Выводы по разделу 1. Проанализированы основные характеристики объекта исследования и на основании этого обосновано применение технических регламентов для проверки соответствия эксплуатационной безопасности низковольтное комплектное устройство. Проанализированы применяемые схемы сертификации, применимые к низковольтному комплектному устройству и обоснован сертификационный подход в соответствии со схемой типа 1 б. Проанализированы обоснованные для сертификации НКУ ТР 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» и ТР 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств». Дана оценка выбор количества образцов для испытаний и показано, что с целью повышения вероятности выявления несоответствия продукции, и минимизации рисков в эксплуатации необходимо тестировать минимум три образца. Данное минимальное количество необходимо для статистической оценки результатов.

2 Совершенствование экспериментальной базы для обеспечения сертификационных испытаний

2.1 Требования к испытательной сертификационной лаборатории

Основные технические требования к сертификационной испытательной лаборатории регламентирует международный нормативный документ ISO/IEC 17025 [38], в котором указывается о обязательном обеспечении качества результатов тестов. В соответствии с его внутренними положениями сертификационная лаборатория должна располагать всеми процедурами, обеспечивающими управление качеством для контроля достоверности проведенных тестов и калибровок. Окончательные результаты тестов должны представляться так, чтобы можно было выявить основные закономерности, и там, где целесообразно, применять статистические методы обработки результатов для окончательного анализа результатов. Сюда должно включаться следующее:

- периодическое применение аттестованных образцов, а также проведение внутреннего контроля качества;
- обязательно участие в сравнительных межлабораторных тестах и процедурах оценки квалификации персонала;
- резервное дублирование тестов и калибровок с применением различных методов;
- повторные тесты и калибровки сохраняемых испытуемых изделий;
- корреляция результатов тестов.

Надежность и корректность проводимых лабораторией тестов определяют ряд факторов. Среди них можно выделить основные:

- фактор человека;
- методы тестирования и оценка применимости данных методов;
- применяемое тестовое оборудование;
- повторяемость результатов проводимых измерений;

- параметры условий окружающей среды;
- методы и процедуры отбора изделий.

Параметры проводимого контроля качества должны в обязательном порядке анализироваться и систематизироваться. При выявлении и обнаружении случаев отклонения от известного применяемого критерия, должны быть предприняты действия для устранения проблемы с целью недопущения неправильных результатов и выводов.

2.2 Необходимые требования к работающему персоналу лаборатории

В сертификационной лаборатории всю работу со специализированным оборудованием, проведением тестов, оценкой и анализом результатов испытаний, а также и выдачей итоговых протоколов должен в обязательном порядке заниматься персонал, имеющий соответствующие компетенции. Особые специфические нестандартные задачи необходимо поручать рабочему персоналу, имеющему соответствующее специальное образование и опыт.

Персонал кроме специализированной квалификации, опыта работы и необходимых знаний по проводимым тестам, должен обладать:

- базовыми знаниями по технологии производства испытуемых изделий, а также проявляемых дефектов или вероятных ухудшений качества при эксплуатации или обслуживании данных изделий;
- знанием важных и основных требований, содержащихся нормативных документах;
- пониманием значимости выявленных нарушений или ухудшений качества в сравнении с типовым использованием тестируемых образцов.

К работающему персоналу лаборатории в обязательном порядке должны быть сформулированы и доведены цели образования, подготовки и формирования необходимых компетенций. Испытательная сертификационная

лаборатория должна разработать полную политику и процедуру по подготовке и реализации данной подготовке персонала.

2.3 Необходимые требования к условиям окружающей среды в испытательной лаборатории

Испытательная сертификационная лаборатория должна обеспечивать в процессе тестирования изделий условия окружающей среды, которые обеспечивают достоверные итоговые результаты, а также не оказывали бы нежелательное деградиационное воздействие на необходимое качество измерений. Особое важное внимание должно уделяться отбору НКУ для случаев проведения тестов вне помещения сертификационной лаборатории. Технические требования к помещениям, где проводятся тесты и условиям среды, которые могут повлиять на итоговые результаты тестов, должны быть запротоколированы.

Если в технических требованиях или документации на НКУ определены особые условия окружающей среды, то испытательная лаборатория должна обеспечить их контроль в процессе проведения испытаний. Необходимо контролировать чистоту помещений испытательной лаборатории в части пыли и химической загрязненности, давление, внешний электромагнитный фон, влажность, качество электроснабжения и температуру.

В части контроля электромагнитного фона необходимо измерять его спектральную характеристику. Приемлемым критерием считается уровень в измеряемой частотной области на 6 дБ меньше нормы. При использовании открытых площадок не следует проводить измерения электромагнитных помех в условиях атмосферных осадков, т.к. это нарушает проводимость подстилающего покрытия и может оказать влияние на результат тестов.

В случае если в технической документации на НКУ не прописаны условия эксплуатации, то тестирование проводят при нормальных

климатических условиях окружающей среды [6]: температура 25 ± 10^0 С; относительная влажность 45 – 80 % и атмосферное давление: 84,0 - 106,7 кПа.

2.4 Требования к обращению с испытываемыми изделиями

В сертификационной лаборатории для обеспечения стандартов качества должна быть оформлена документация на транспортирование образцов, их получение, защиту и хранение. Прослеживаемость и идентификация испытываемых изделий должна сохраняться в течении всего времени их нахождения в испытательной лаборатории. Применяемая внутренняя система учета и контроля должна быть разработана так, чтобы было однозначная физическая идентификация тестируемых образцов, а также при использовании ссылок на данные образцы в отчетных протоколах.

При возникновении сомнений и разногласий в отношении применимости и пригодности образца для тестирования или образец не соответствует достаточному предоставленному описанию, или необходимые тесты не однозначны, то персонал сертификационной лаборатории должен провести консультации с заявителем и провести все технические выравнивания до начала проведения тестирования.

2.5 Основные требования к испытательному оборудованию

Оборудование для тестирования должны обеспечивать необходимую точность и соответствовать всем базовым испытательным техническим условиям. До момента времени ввода в оборудования эксплуатацию, оно должно быть калибровано или проверено в специализированных организациях. А после все измерительные приборы должны проходить периодическую поверку, которая гарантирует их применимость в тестах. Все испытательное оборудование должно иметь регистрацию, а информация об этом иметь сведения:

- идентификацию каждого конкретного образца испытательного оборудования;
- идентификацию, включающую данные изготовителя, тип и серийный заводской номер;
- данные поверок и калибровок соответствия требованиям испытательного оборудования;
- инструкции по эксплуатации;
- даты, протоколы документов о поверке и калибровке, критерии приемки оборудования и дату следующей калибровки или поверки;
- план технического обслуживания и карты проверок на проведенное обслуживание испытательного оборудования;
- подробное описание повреждений, модернизаций и проведенного ремонта испытательного оборудования.

Если в процессе эксплуатации были нарушены условия использования оборудования, и оно выдает неподтверждаемые результаты, или оказалось нарушено его функционирование, то оно выводится из применения в эксплуатации. Данное оборудование консервируется с целью исключения его в использовании до его ремонта и проверки нормального функционирования.

При выходе оборудования из-под непосредственного прямого контроля сертификационной лаборатории, то после возврата должна быть подтверждена нормальная работоспособность и только после этого оборудование может применяться в дальнейших тестах. Для обеспечения уверенности актуальной калибровки испытательного оборудования необходимо вводить внутренние лабораторные промежуточные проверки. Все настройки оборудования, которые могут повлиять на результаты тестов необходимо исключить.

2.6 Разработка требования к качеству проводимых испытаний

Для обеспечения контроля соответствия требуемым параметрам лабораторного оборудования в интервале между проводимыми поверками,

необходимо осуществлять внутреннюю проверку испытательного комплекса. Данную проверку следует проводить по утвержденной процедуре и в соответствии с графиком. Например, один раз в неделю. В части контроля измерительного тракта при ЭМС испытаниях на помехоэмиссию предлагается проводить проверку при помощи широкополосного излучающего генератора, который показан на рисунке 2 и создает шумоподобный сигнал в диапазоне от 30 до 1000 МГц. Конкретных требований, прописанных в нормативной документации на внутреннюю периодическую проверку, не существует. Поэтому сертификационная лаборатория обеспечивает их разработку сама и затем утверждает эти требования в виде внутреннего документа.

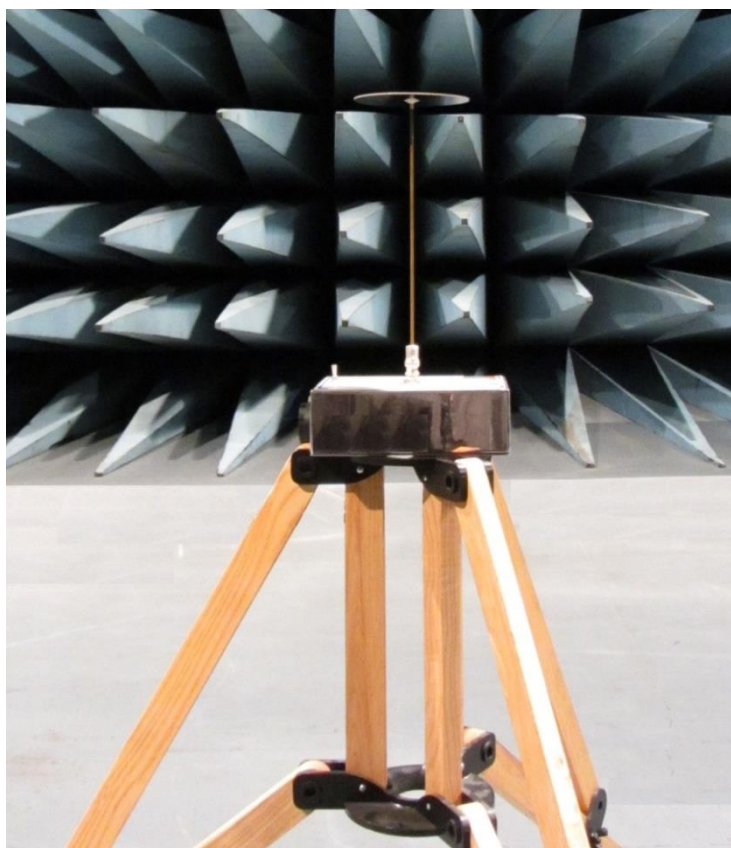


Рисунок 2 – Широкополосный излучающий генератор диапазона частот 30 – 1000 МГц

Промежуточная проверка измерительного канала помехоэмиссии сводится к измерению уровня наведенного электромагнитного поля на применяемую лабораторией приемную антенну в диапазоне частот 30-1000

МГц и сравнении полученной амплитудно-частотной характеристики с базовой. Базовая амплитудно-частотная характеристика формируется после очередной плановой поверки измерительных систем. На рисунке 3 представлена предлагаемая схема промежуточной проверки тракта с указанием конкретных расположений излучателя и приемной антенны.

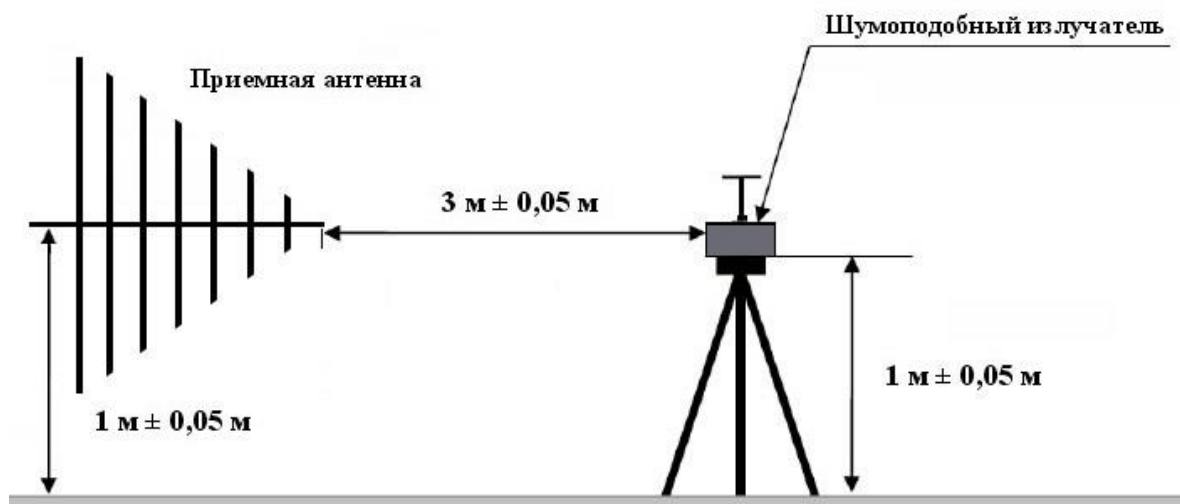


Рисунок 3 – Предлагаемая схема промежуточной проверки измерительного тракта при помощи широкополосного излучателя сигналов

Критерием целостности измерительного тракта является условие отклонения измеренной характеристики от базовой не более чем на 6 дБ. В случае периодической внутренней проверки отклонение составит более 6 дБ, это говорит об нарушениях измерительного тракта, например, ненадежном контакте кабеля. Поэтому до выявления конкретной причины тесты не проводятся.

На рисунке 4 показан конкретный пример, выполненный в ходе промежуточной проверки измерительного тракта, включающего антенну, коаксиальный кабель и измерительный приемник.

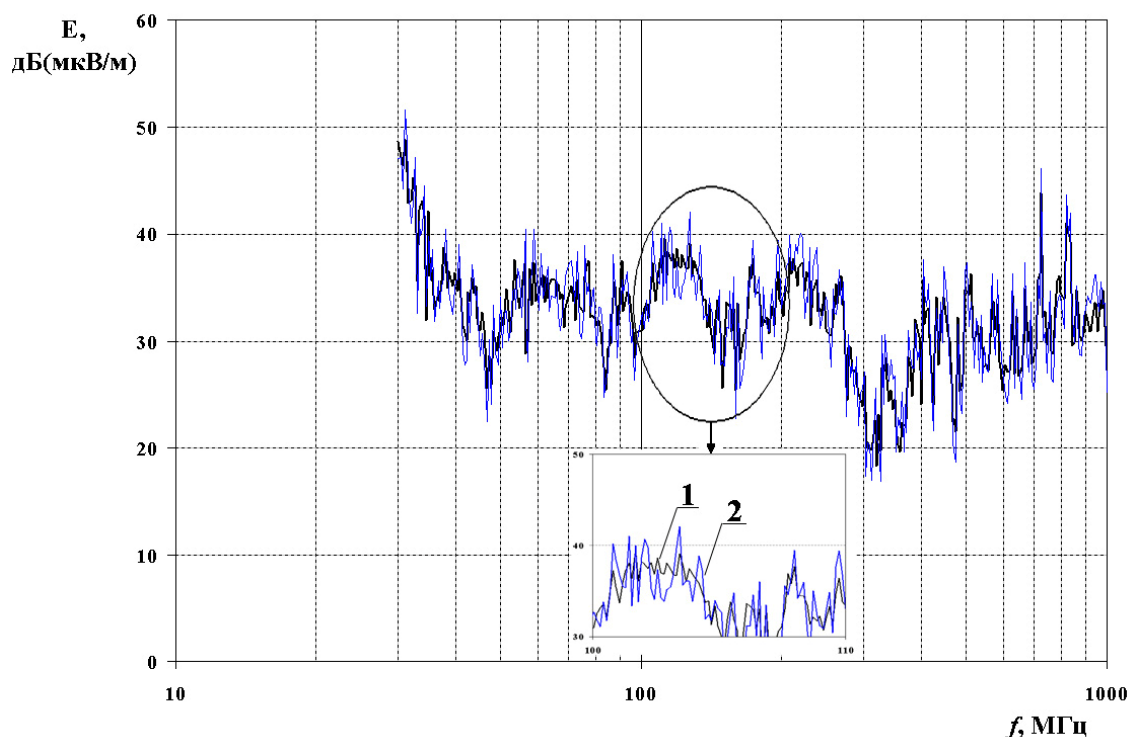


Рисунок 4 – Пример промежуточной проверки измерительного тракта:
 1 – базовая амплитудно-частотная характеристика; 2 – измеренная
 промежуточная амплитудно-частотная характеристика

Контроль качества электромагнитного воздействия

При испытаниях изделий на восприимчивость к электромагнитному воздействию на соответствие требованиям стандарта [7] необходимо периодически проверять на выходном каскаде усилителя мощности уровень гармонических составляющих. Разница уровней основной частоты и каждой из гармоник должна быть как минимум 6 дБ (рисунок 5). Смысл такой проверки имеет следующую суть – если при разнице меньше 6 дБ и на частоте гармоники частотная характеристика полеобразующей системы имеет подъем, то может возникнуть ситуация, когда напряженность электромагнитного поля на частоте гармонической составляющей будет больше, чем на несущей частоте воздействия. В случае нарушения работоспособности тестируемого НКУ произойдет не корректная интерпретация результатов тестирования.

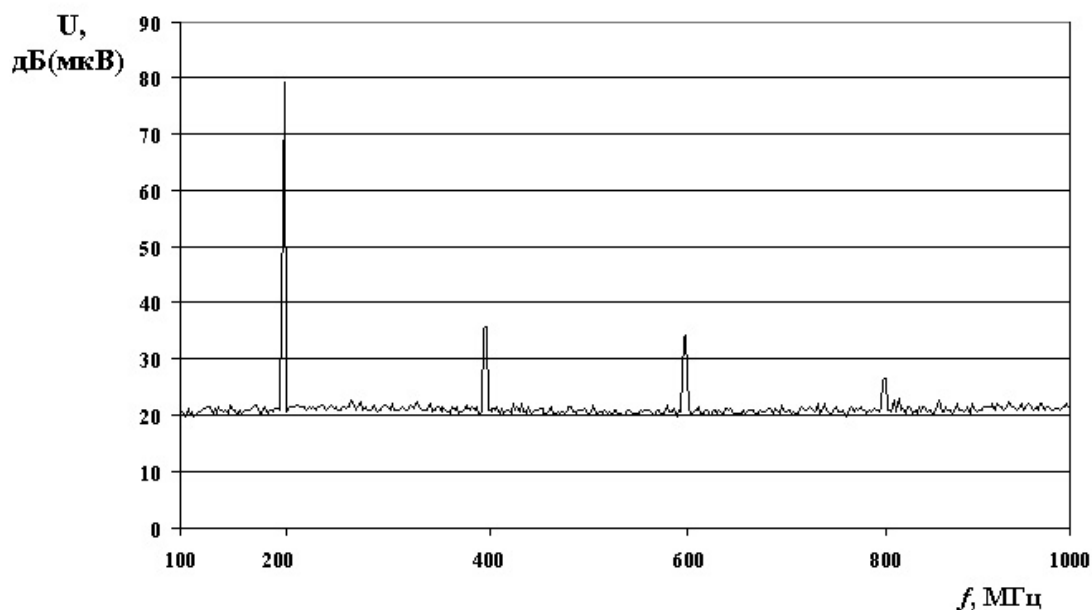


Рисунок 5 – Проверка качества усилителя мощности по уровню гармоник

Периодические проверки амплитудных параметров усилителя мощности.

Вторая периодическая проверка для проведения испытаний на восприимчивость к электромагнитному излучению касается амплитудной характеристики усилителя. Контролируется линейность данного параметра. Линейным участком считается диапазон до точки на координатной плоскости мощности, в которой при заданной входной мощности уровень выходной мощности на 1 децибел меньше идеализированного (рисунок 6). При этом однозначно во всем линейном диапазоне сопоставляется изменение мощности на входе излучающей антенны к изменению генерируемой напряженности электромагнитного излучения.

При условии того, что базовые значения калибровки мощности электромагнитного воздействия лежат ниже точки 1 децибел, то при поиске порога восприимчивости НКУ, применяемая программа, пересчитывая, подбирает необходимые значения выходной мощности, а реальный уровень электромагнитного излучения будет совпадать с расчётным. Периодическая проверка амплитудной характеристики усилителя производится при

подключении к выходу нагрузки сопротивлением 50 Ом. Линейный диапазон определяется экспериментальными измерениями входной и выходной мощностей (рисунок 6). На рисунке 7 показан пример выходных характеристик усилителя мощности для диапазона частот 80 – 2000 МГц.

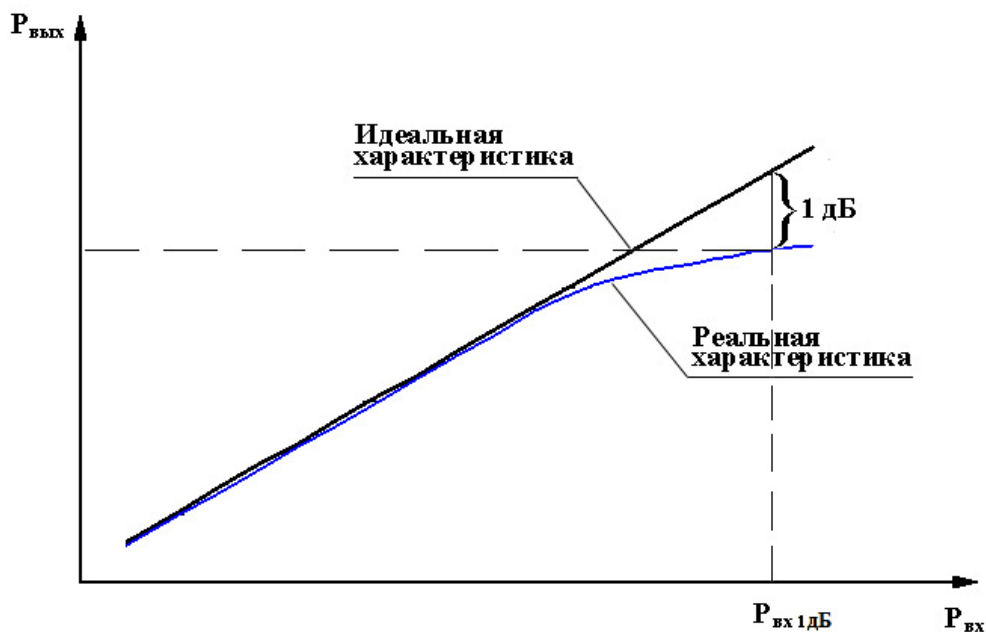


Рисунок 6 – Пояснение к определению линейного участка усилителя мощности при испытаниях на помехоустойчивость

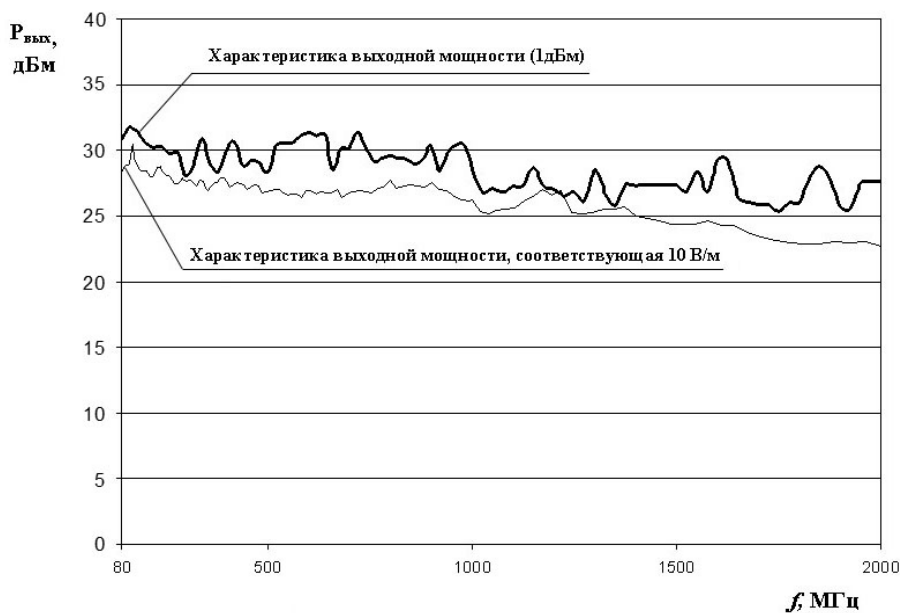


Рисунок 7 – Выходные характеристики мощности усилителя

Межкамерные сравнения сертификационных лабораторий. Актуален вопрос - насколько сопоставимы и коррелируются между собой результаты тестирования изделий в различных лабораториях? Как точно будут сопоставимы результаты испытаний одного и того же изделия? Поэтому межкамерные сравнения сертификационных лабораторий следует проводить для проверки и анализа сопоставимости однотипных тестов.

Предлагается методика сравнения лабораторий ЭМС по распределению амплитудно-частотных характеристик параметров электромагнитного поля в нескольких позициях объема камеры или испытательной площадки. На основании предложенного подхода, на рисунках 8 и 9 показаны примеры топологических схем, сравниваемых ЭМС камер для случаев тестирования на помехоэмиссию и помехоустойчивость к электромагнитному излучению.

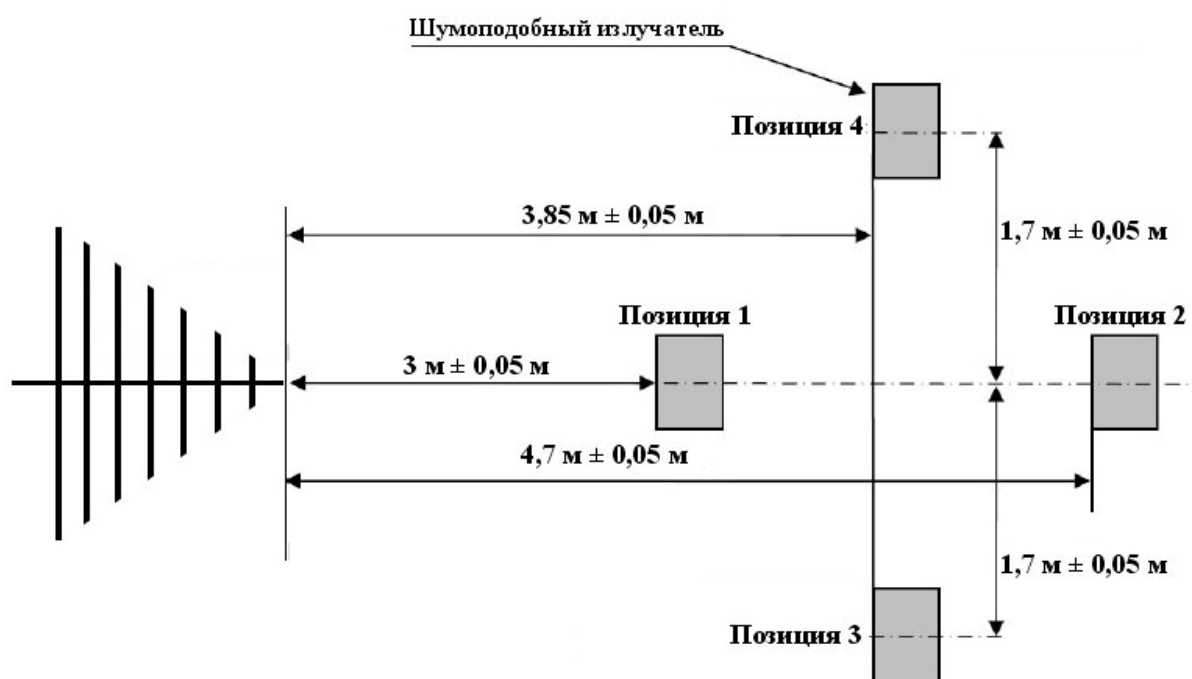


Рисунок 8 – Сравнение ЭМС камер для тестирования на помехоэмиссию

Сравнительные исследования сертификационных ЭМС лабораторий допустимо считать сопоставимыми, если на 80% частот разность между полученными значениями электромагнитного поля составляет не более 6 дБ.

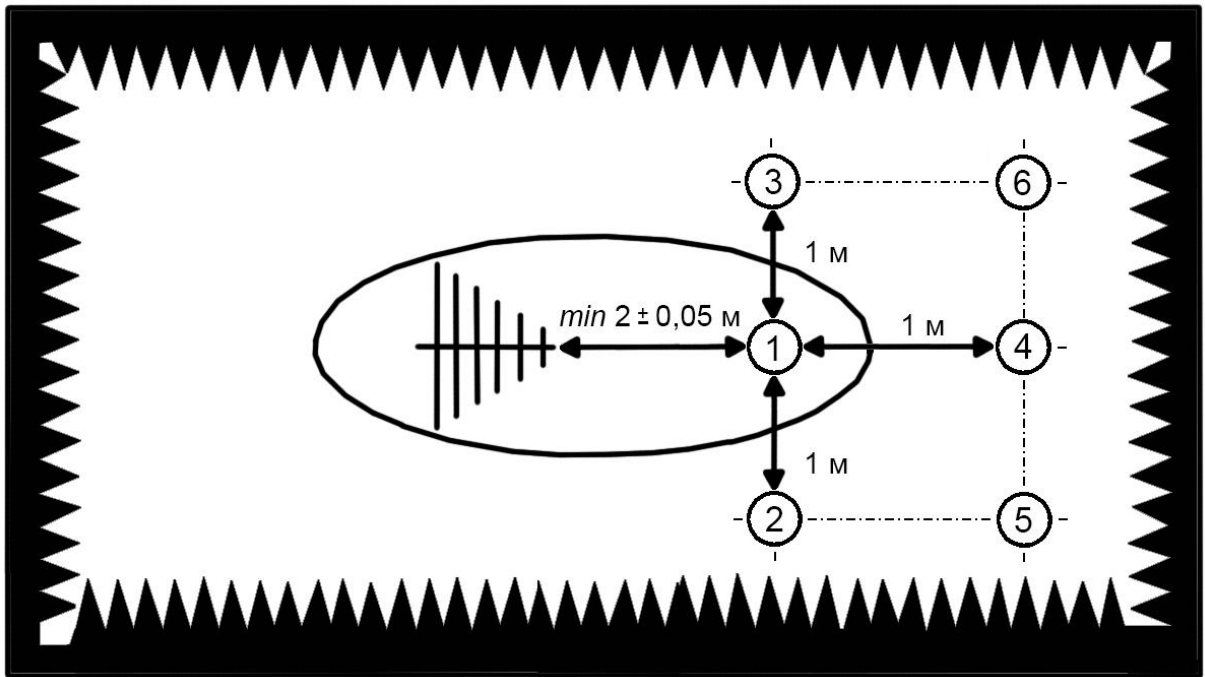


Рисунок 9 – Схема сравнения ЭМС камер для тестирования на помехоустойчивость к электромагнитному излучению

2.7 Выбор и обоснование конструкции радиобезэховой камеры

Радиобезэховые камеры (БЭК) предназначены для минимизации влияния внешних условий. В конструкции БЭК применяются радиопоглощающие материалы (РПМ), позволяющие, за счет поглощения в своей толще электромагнитной энергии обеспечить условия свободного пространства в испытательной зоне [9]. Для обеспечения безэховости к РПМ предъявляют два основных требования, которые в общем случае являются противоречивыми. Это потери электромагнитной энергии за счет затухания в толще материала и минимизация отражения излучения от поверхности РПМ. Сейчас разработано достаточно большое количество разновидностей РПМ, имеющих оптимальные параметры. В тоже время есть различные способы обойти данное противоречие. Они строятся на методах согласования волновых сопротивлений сред распространения [20], [21], [27].

Самыми простыми с позиции практической реализации являются материалы резонансного типа, например, четвертьволновый РПМ, который

состоит из слоя толщиной d , имеющий определенное значение проводимости σ и устанавливается на расстоянии, равном четверти длины электромагнитной волны λ от металлической поверхности камеры (рисунок 10). Его входное сопротивление определяется формулой

$$Z_{\text{вх.погл}} = Z \cdot \text{cth}(jkd), \quad (2)$$

где $Z_{\text{слоя}}$ – волновое сопротивление;

k и d – волновое число и толщина слоя РПМ.

Для обеспечения согласования РПМ с воздухом, необходимо реализация условия $Z_{\text{вх.погл}} = Z_0$, где Z_0 – сопротивление воздуха или свободного пространства. Разложим (2) в ряд Тейлора и оставим в нем только первый член:

$$Z_0 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \varepsilon'_{\text{слоя}} \cdot \varepsilon_0 \cdot d \cdot \left(\frac{1 + \sigma}{j \cdot \omega \cdot \varepsilon'_{\text{слоя}} \cdot \varepsilon_0} \right)}. \quad (3)$$

Правая часть (3) имеет действительный корень при условии $\sigma / \omega \varepsilon'_{\text{слоя}} \varepsilon_0 \gg 1$. Отсюда

$$Z_0 = \frac{1}{\sigma d}, \text{ или } \sigma d = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}. \quad (4)$$

Для уменьшения толщины РПМ между отражающей металлической поверхностью и внешним слоем РПМ можно применить материал с большой диэлектрической проницаемостью $\varepsilon'_{\text{пр.слоя}}$:

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon'_{\text{пр.слоя}}}}. \quad (5)$$

Также можно применить четвертьволновый трансформатор. Физически он представляет собой согласующий диэлектрический слой между РПМ и свободным пространством (рисунок 2). При известном Z_0 и $Z_{\text{вх.погл}}$, для $\varepsilon''_{\text{погл}} \ll \varepsilon'_{\text{погл}}$ и $\mu''_{\text{погл}} = 0$, толщина трансформатора будет равна:

$$d = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon'_{\text{погл}} \cdot \mu'_{\text{погл}}}} \Rightarrow k_1 d = \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

а его входное сопротивление:

$$Z_{\text{ТР}} = \sqrt{Z_{\text{вх.погл}} \cdot Z_0}. \quad (7)$$

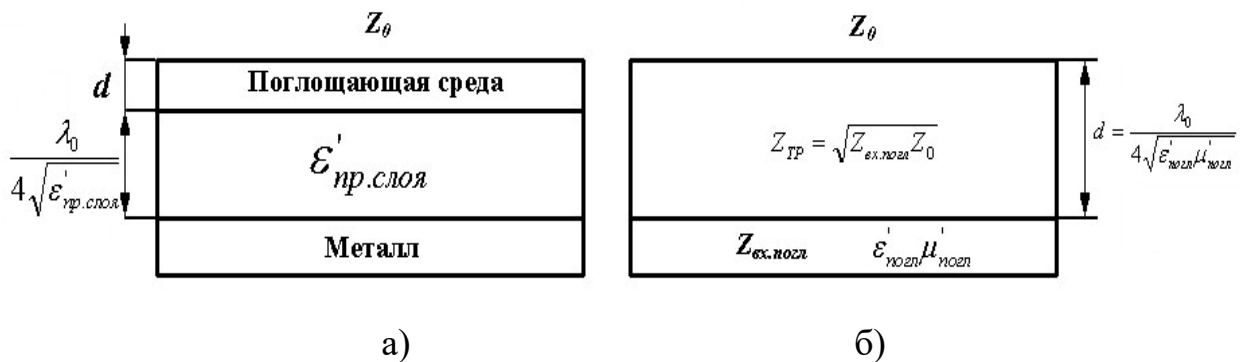


Рисунок 10 – РПМ резонансного типа: а) четвертьволновый; б) на основе четвертьволнового трансформатора

Недостатком РПМ резонансного типа является их работа на поглощение энергии в узком диапазоне частот. Поэтому для задач сертификации широкого диапазона частот 30 МГц – 6 ГГц необходимо применять РПМ более сложных конструкций.

РПМ градиентного типа изготавливаются по технологиям слоисто-неоднородной структуры. Их волновые сопротивления монотонно

изменяются от 377 Ом до значений, обеспечивающих наличие пренебрежимо малых отражения электромагнитной энергии (рисунок 11). Их коэффициент отражения удовлетворяет выражению Рикатти:

$$\frac{dR_{omp}}{dz} + 2 \cdot j \cdot \beta \cdot R_{omp} + \chi \cdot (1 - R_{omp}^2) = 0, \quad (8)$$

где $\beta = \beta(z)$ – масштаб фазовой длины в поглощающем слое z .

Для обеих поляризации электромагнитного излучения

$$\begin{aligned} \beta(z) = \beta_{\perp}(z) &= k_0 \sqrt{n_{np}^2(z) - \sin^2 \varphi_{nad}(z)}; \\ \beta(z) = \beta_{\parallel}(z) &= \frac{k_0 \sqrt{n_{np}^2(z) - \sin^2 \varphi_{nad}(z)}}{n_{np}^2(z)}; \end{aligned} \quad (9)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ – постоянная распространения излучения в воздухе;

$n_{np}(z)$ – коэффициент преломления поглощающего слоя z ;

$\varphi_{nad}(z)$ – угол падения электромагнитной волны в поглощающем слое

z ; $\chi(z)$ – изменение фазового масштаба в поглощающем слое РПМ z :

$$\chi_{\perp}(z) = \frac{d\beta_{\perp}}{dz} \cdot \frac{1}{2\beta}; \quad (10)$$

$$\chi_{\parallel}(z) = \frac{d\beta_{\parallel}}{dz} \cdot \frac{n_{np}^2(z)}{2\beta}.$$

Формулу Рикатти с учетом граничных условий отсутствия электромагнитной волны и отражения при $z \rightarrow \infty$ допустимо преобразовать в вид

$$R_{omp}(z)e^{jL(z)} = -\int_z^{\infty} \chi [1 - R_{omp}^2(z)] \cdot e^{jL(z)} dz, \quad (11)$$

где $L(z) = 2 \int_{z_0}^z \beta(z) dz$ – фазовая длина электромагнитного излучения.

Проблема создания РПМ с достаточно маленьким уровнем отражения волны состоит в реализации функции оптимального изменения градиента масштаба фазовой длины волны $grad \beta(z)$. Изготовление РПМ рассматриваемого типа делается в виде слоистой структуры слоев с постоянными параметрами (рисунок 11 и рисунок 12).

Типовой параметр отражения материалов градиентного типа, который допустимо использовать при создании безэховых камер, составляет 20 дБ.

РПМ интерференционного типа. К широкополосным РПМ интерференционного типа, использующихся в БЭК, относятся ферритовые. Данные РПМ состоят из поглощающих материалов, в состав которых входят магнитные элементы и нанесенные на металлическую пластину (рисунок 13). Согласование с внешней средой достигается за счет заданного соотношения магнитных потерь волны, толщины и длины материала.

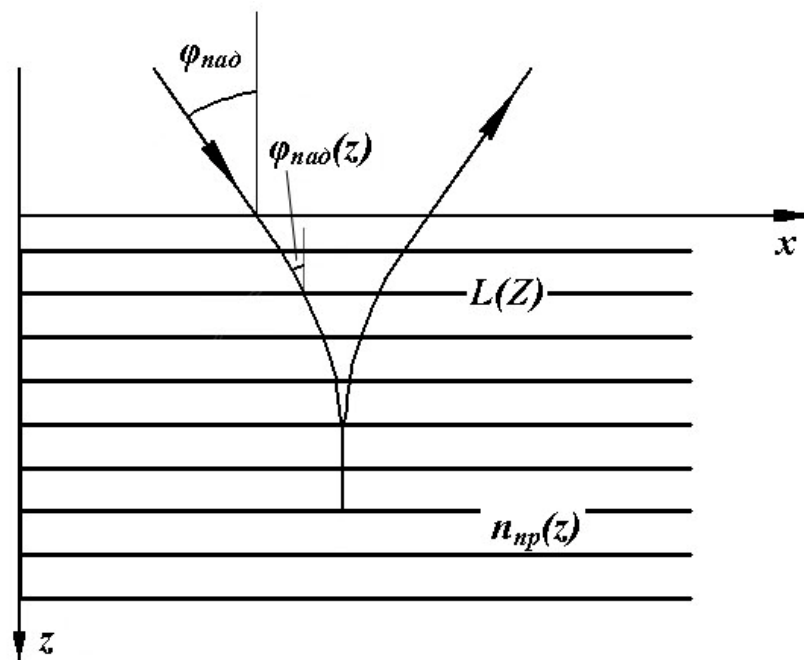


Рисунок 11 – РПМ градиентного типа

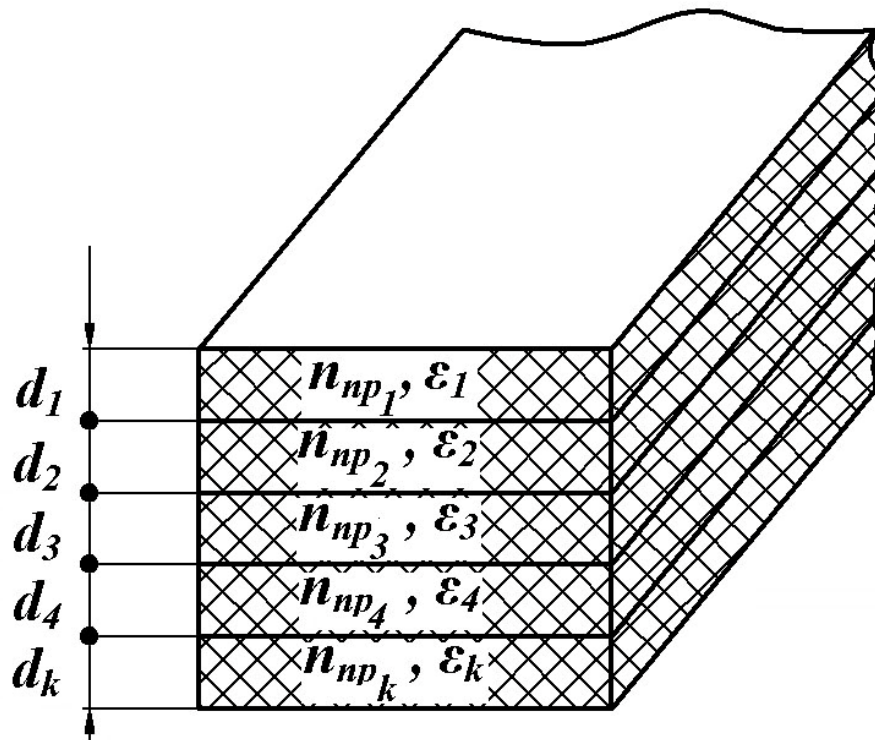


Рисунок 12 – РПМ градиентного типа на базе слоев с постоянными диэлектрическими параметрами

Согласно (5) коэффициент отражения волны от магнитного материала d на металлической пластине определяется формулой

$$R_{omp} = \frac{Z_{ex} - 1}{Z_{ex} + 1} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot th(\sqrt{\varepsilon\mu} \cdot k_0 \cdot d) - 1}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot th(\sqrt{\varepsilon\mu} \cdot k_0 \cdot d) + 1}. \quad (12)$$

При небольшой толщине РПМ и выполнения условия $\mu_2 \gg \mu_1$ справедливо выражение

$$R_{omp} \approx \frac{(\mu_2 k_0 d - 1)}{(\mu_2 k_0 d + 1)}. \quad (13)$$

Из (13) получается условие, которое показывает отсутствия отражения от РПМ:

$$\mu_2 = \frac{1}{k_0 \cdot d} = \frac{\lambda}{2\pi d}. \quad (14)$$

Достоинством интерференционных РПМ является то, что они широкополосные, негорючие и выдерживают большую плотность потока энергии (до 3 Вт/см²). Но ферритовые РПМ тяжелы.



Рисунок 13 – РПМ интерференционного типа

РПМ рассеивающего типа. Высококачественным ЭМС материалом для разработки БЭК являются РПМ рассеивающего типа. Их объемная структура характеризуется сильной поперечной неоднородностью, т.к. выполнена в виде конусовидных или пирамидальных конструкций. РПМ данного типа в сравнении другими РПМ отличаются большими габаритными размерами, но имеют ряд достоинств. Основное преимущество состоит в том, что достаточно легко реализуется необходимая полоса рабочих частот и достигается небольшой коэффициент отражения волны. РПМ технологичны в производстве и обладают приемлемыми эксплуатационными параметрами.

Характер поглощения РПМ зависит от длины падающей волны электромагнитного излучения. При периоде повторения расположения поглотителей много меньше длины волны излучения, то материал не отличается от градиентных РПМ. Если λ больше, чем поперечная неоднородность пространственной структуры, то наблюдается многократное

отражение излучения от поверхности РПМ (рисунок 14). При каждом падении волны на грань РПМ некоторая часть излучения поглощается в материале. Ослабление, при длине волны больше, чем период повторения расположения РПМ, с учетом количества переотражений в клиновидных структурах:

$$R_{осл} = \prod_{n=1}^N R_{осл}(\nu_n), \quad (15)$$

где ν_n – угол падения электромагнитной волны на грань РПМ при количестве n отражении:

$$\nu_n = \frac{(\pi + \alpha)}{2} - n\alpha - \Theta_{пад}, \quad (16)$$

где $\Theta_{пад}$ – угол падения волны на грань РПМ по отношению к высоте поглотителя;

α – клиновидный угол.

Для достижения, заданного коэффициента отражения должно быть некоторое минимальное количество переотражений:

$$\sum_{n=1}^{N+1} h_n < 0, \quad (17)$$

где h_n – вертикальное перемещение в полости точки n^{20}

Отражения волны, равно:

$$h_n = \frac{2 \cdot (H - \sum_{i=1}^n h_i) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \Theta_{n-1} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (18)$$

где Θ_{n-1} – угол, сформированный отраженной волной и осью симметрии пирамиды:

$$\Theta_{n-1} = \alpha(n-1) + \Theta_{nao} . \quad (19)$$

Угол выхода электромагнитной волны из РПМ определяется из формулы:

$$\Theta_N = (\Theta_{nao} + \alpha N) \cdot (-1)^N . \quad (20)$$

Согласно расчетам для диапазона углов падения волны $0^\circ \leq \nu_n \leq 45^\circ$ затухание при одиночном отражении будет 17 дБ. При трехкратном отражении в РПМ электромагнитная волна будет иметь потери 50 дБ.

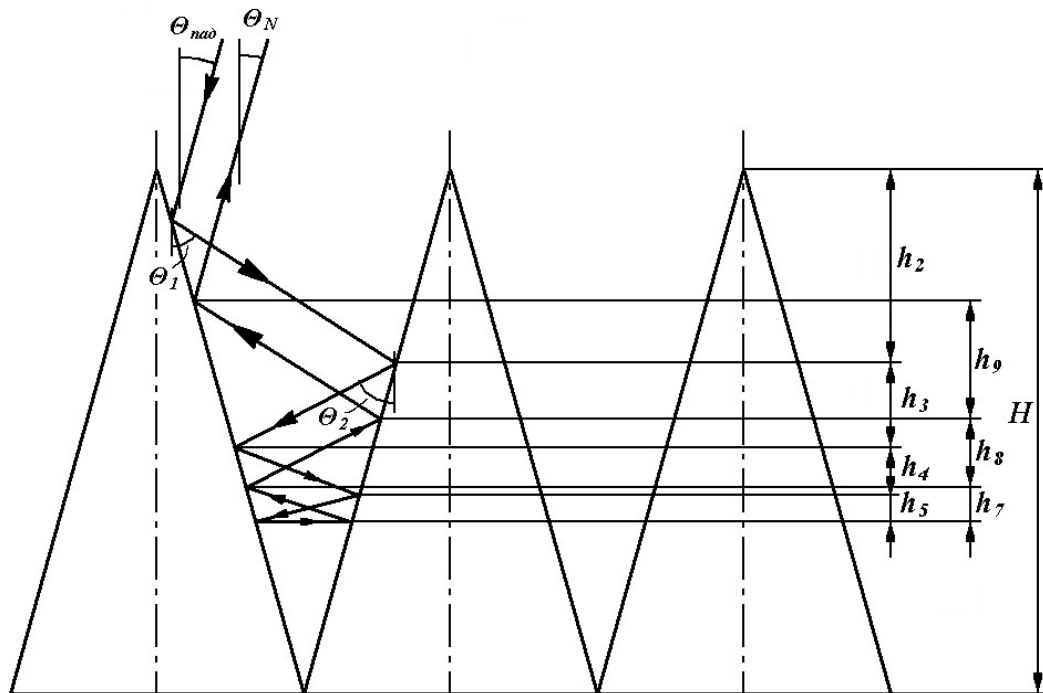


Рисунок 14 – Физика работы РПМ рассеивающего типа

Базовым параметром, характеризующим свойства БЭК, является коэффициент безэховости, который показывает уровень отраженного сигнала от поверхностей камеры. Обеспечить одинаковый коэффициент безэховости во всем объеме камеры достаточно сложная, а зачастую

нереализуемая задача. Поэтому в технических требованиях задается данный параметр в испытательной зоне, которая называется безэховой.

Обеспечение необходимого коэффициента безэховости, исходит из требований точности проводимых испытаний, а также допустимых отражений электромагнитных волн в зону безэховости от каждой поверхности безэховой камеры. Исходя из этого применяемая классификация БЭК использует в своей основе величину уровня отраженной электромагнитной волны (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация БЭК по качеству

Класс БЭК	Коэффициент безэховости, дБ	Базовое применение БЭК
0	менее - 65	Прецизионные испытания
I	-65 ... -45	Точные контрольные испытания
II	-45...-25	Отработка большинства измерений
III	-25...-15	Оценочные испытания

Задачи организации безэховой области в БЭК включают в себя выбор РПМ соответствующего качества, а также расположения источников и измерительных систем по отношению друг к другу.

Форма и конфигурация БЭК зависит в основном от назначения и видов используемых тестов. Для сертификационных испытаний изделий можно ограничиться несколькими типами [37].

Рупорные БЭК. Основным применением данного типа камер в сертификации является тестирование объектов на восприимчивость к электромагнитному воздействию. Конструкция данного типа представляет собой наклонённые друг к другу стены таким образом, что внутреннее поперечное сечение БЭК увеличивается по направлению от одного конца к другому. Зачастую широкая часть БЭК завершается прямоугольной зоной, где и помещается при тестах изделие (рисунок 15). Достоинством данных камер служит отсутствие в ней отраженных электромагнитных волн от боковых стенок. Это достигается тем, что излучающая направленная антенна

установлена в вершине рупора, из-за этого возникает эффект скользящих вдоль стен лучей. Данное свойство позволяет применить РПМ невысокого качества [39].

Недостатком рупорных БЭК для задач сертификации является сложность организации площадки с затуханием 4 дБ для измерения помехоэмиссии.

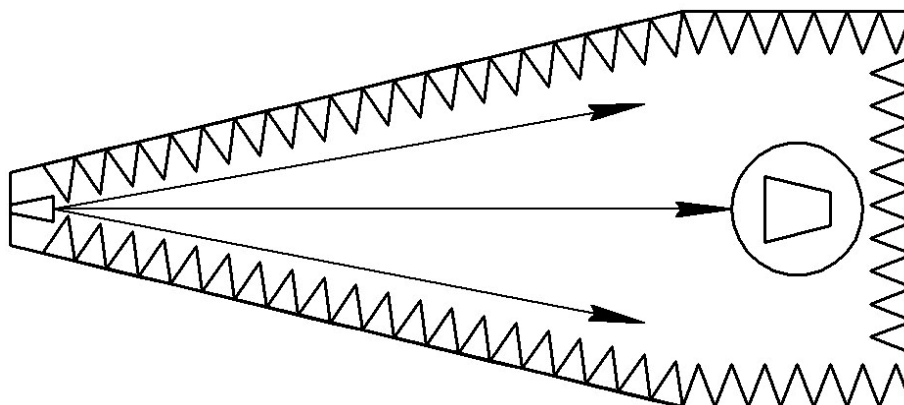


Рисунок 15 – Рупорная БЭК

Прямоугольные БЭК. Данный тип БЭК получил наибольшее распространение из-за своей конструкции. Данная конфигурация достаточно просто реализуется под помещения зданий. Продольные размеры БЭК выбираются из условий расстояния источника и приёмника. Для сертификационных испытаний это минимальное расстояние 3 метра, высота – 4 метра.

Для сертификационных испытаний постройка полностью безэховой камеры целесообразна только при испытаниях на восприимчивость (рисунок 16), т.к. при испытаниях на помехоэмиссию необходимо реализовать отражающий пол. В данном случае БЭК переходит в разряд полубезэховых камер.

Отсюда следует, что по классификации, БЭК предназначенные для сертификационных испытаний могут быть третьего класса, т.к. металлический

пол вносит существенную составляющую отражения в измерения, из-за чего коэффициент безэховости значительно падает.

Немаловажным фактором в создании БЭК является их себестоимость. Поэтому будет достаточным обеспечить внутреннее покрытие с учетом минимизации отражений от основных внутренних участков. Для уменьшения отраженных волн, целесообразно разместить шиты с РПМ или покрыть ими стены в зонах зеркального и двукратного электромагнитного отражения (рисунок 17).

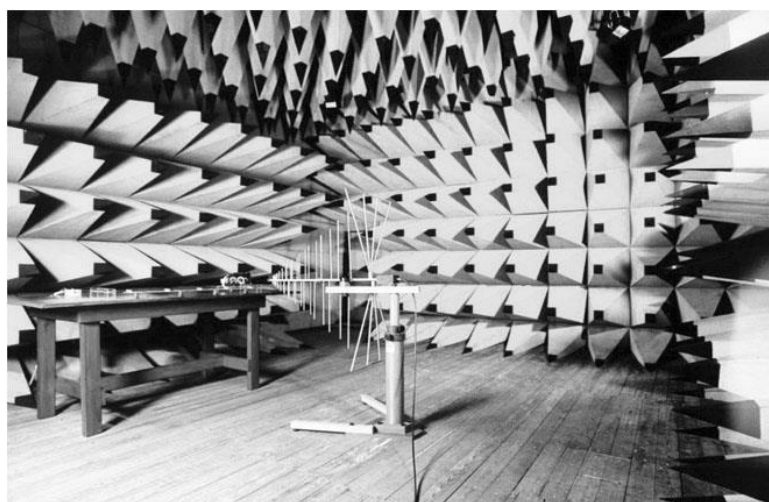


Рисунок 16 – Полностью безэховая камера для испытаний на восприимчивость к излучению

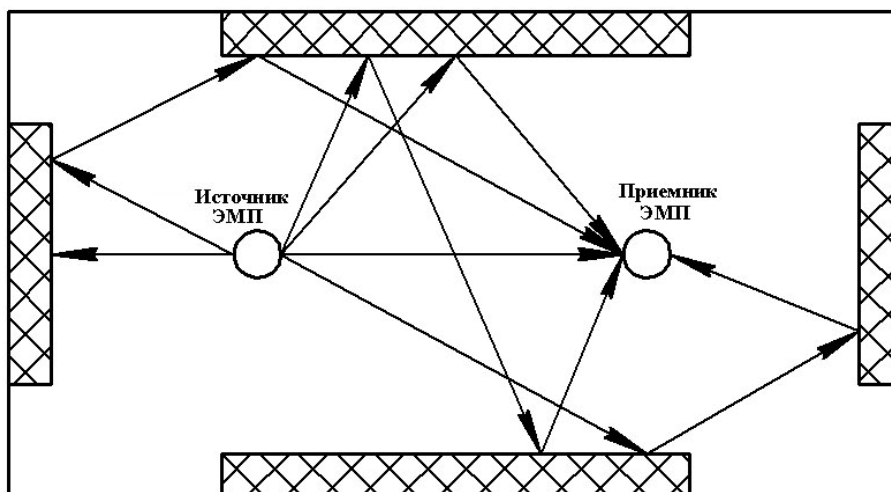


Рисунок 17 – Минимизация отраженных волн в БЭК

Для проведения испытаний на восприимчивость к электромагнитному воздействию, чтобы уменьшить отраженную волну от проводящего пола достаточно расположить РПМ в зоне излучающей антенны и тестируемого образца. При испытаниях на помехоэмиссию в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц радиопоглощающие покрытия убираются с горизонтальной поверхности, и сертификация осуществляется в условиях полного металлического покрытия пола [40].

В соответствии с [8] для измерения помехоэмиссии от изделий, приходящих на сертификацию, горизонтальная площадка испытательной области, в частности БЭК, должна быть выполнена из материала высокой проводимости. Требования на размеры площадки, с учетом размещения испытательного оборудования, представлены на рисунке 18.

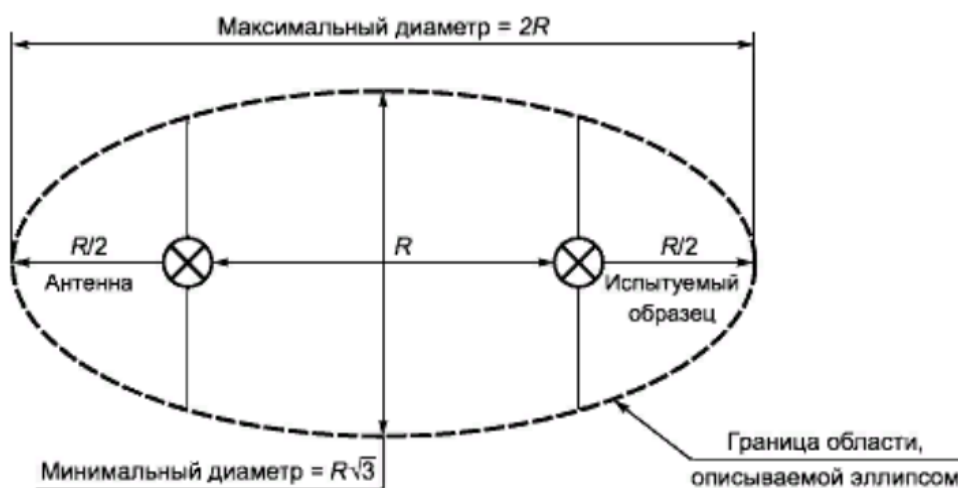


Рисунок 18 – К расчету размеров металлического пола БЭК

Соответственно, если принять расстояние между измерительной антенной и сертифицируемым образцом равным 3 м, то соответственно максимальный размер площадки составит 6 метров, а ширина 5,2 м. Размеры прямоугольной площадки с указанием топологических позиций размещения оборудования представлены на рисунке 19. Рассчитанная площадь должна покрываться пластиной из материала высокой проводимости $\sigma=10^7$ см/м.

Данному требованию удовлетворяют сталь и медь. С учетом оптимальной стоимости целесообразно выбрать сталь. Для частот 1000 МГц глубина проникновения электромагнитного поля в металл составляет порядка 1 мкм, соответственно это меньше, чем толщина промышленного листа стали, поэтому вопросы применяемой толщины пластины не является актуальными.

При изготовлении металлического пола в БЭК из более чем одной пластины, составные части укладываются внахлест с заходом не более 1 см друг на друга. Выбор расстояния между соединительными элементами частей металлических пластин выбирается из условия $\lambda/10$, где $\lambda=30$ см - длина волны, соответствующая самой верхней частоте измеряемого электромагнитного поля. Это соответствует расстоянию 3 см (рисунок 20).

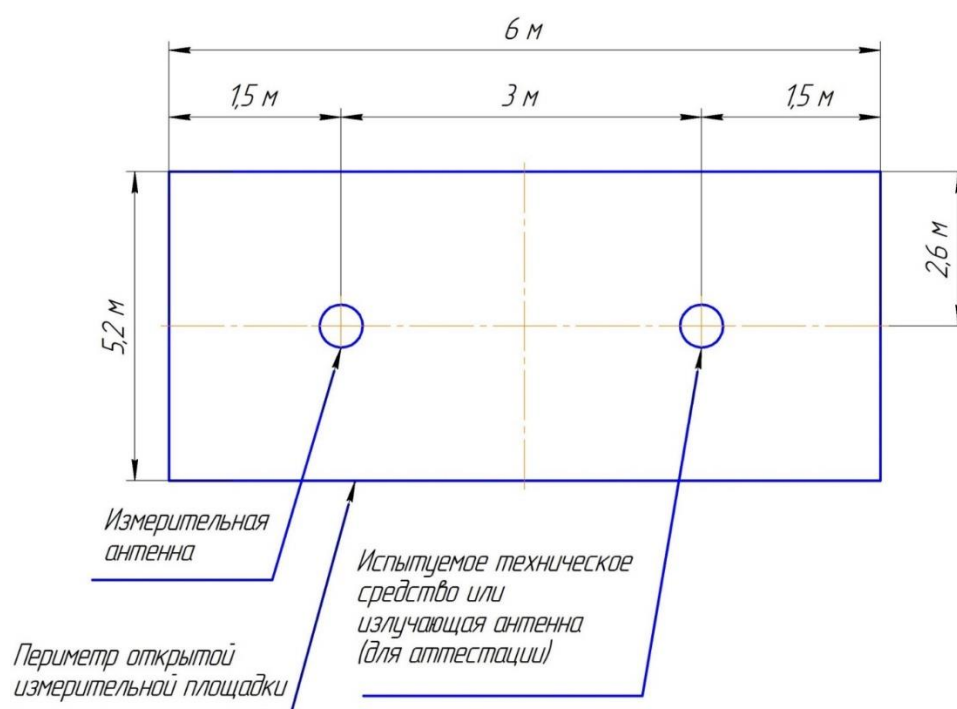


Рисунок 19 – Габаритные размеры измерительной площадки

При применении между частями металлической пластины заземления гибкой металлической сетки толщиной не более 1 мм (рисунок 21), то допустимо делать расстояние между крепежными элементами частей пластины заземления до 30 см. При этом необходимо проверить обеспечение

условия максимального размера щелей 3 см.

Для минимизации диффузного отражения от металлической пластины заземления она должна иметь неровности не более 4,5 см.

Из приведенных расчетов вытекают минимальные размеры внутреннего свободного пространства БЭК: длина: 6 м; ширина: 5,2 м и высота 4 м. Т.к. измерительная камера имеет металлический пол, то она соответствует третьему классу качества. Соответственно для создания БЭК адекватно применять РПМ градиентного, интерференционного, так и рассеивающего типов, или их комбинации [42].

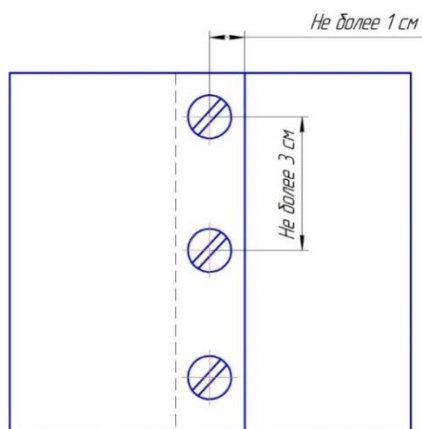


Рисунок 20– Схема соединений металлической пластины заземления

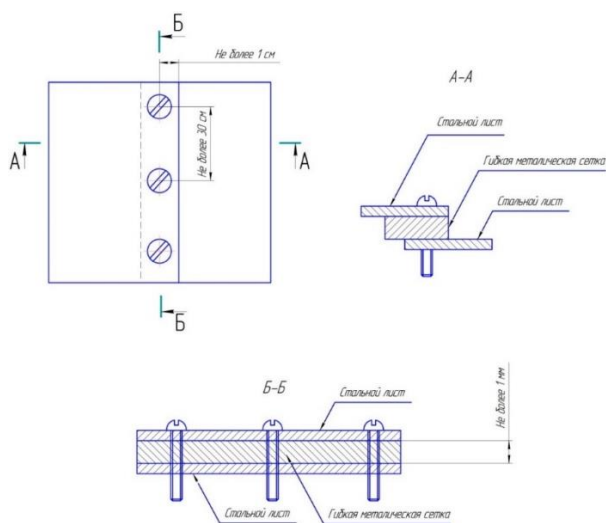


Рисунок 21 – Альтернативное соединение пластины заземления

2.8 Совершенствование методики аттестации безэховой камеры для испытаний на помехоэмиссию

Для проведения сертификационных ЭМС испытаний в части измерений уровня помехоэмиссии необходимо подтверждение соответствия параметров полубезэховой камеры требованиям, предъявляемым к открытой измерительной площадке по ГОСТ 30805.16.1.4. Так как по условию задачи измерительное расстояние в БЭК равно три метра, то соответственно и совершенствование методики аттестации будет произведено для данного расстояния.

В соответствии с имеющимися данными на размеры БЭК передающая и приемная антенны располагаются на металлическом полу на расстоянии 3 м. С целью минимизации погрешности измерения для максимальной частоты 1000 МГц, т.е. длине волны 30 см введем условие допуска на разброс позиционирования

$$\Delta = \lambda/6 = 30 \text{ см}/6 = 5 \text{ см.} \quad (21)$$

Для минимизации диффузного рассеяния мачты обеих антенн необходимо выполнять из непроводящего материала. Например, деревянные или пластмассовые с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \leq 10$. Коаксиальные радиочастотные кабели следует подсоединять антеннам, так чтобы они находились позади антенн и были перпендикулярны оси ориентации электрических вибраторов. Коаксиальные кабели должны опускаться по диэлектрическим опорам, а прокладываться по полу параллельно антеннам (рисунок 22).

Измерительный приемник, как и генератор сигналов должны располагаться за внутренней областью БЭК. Электроснабжение испытательных систем должна находиться снаружи БЭК и входить в камеру

через фильтры, а ее трассировку необходимо выполнять под прямым углом относительно оси измерения [41].

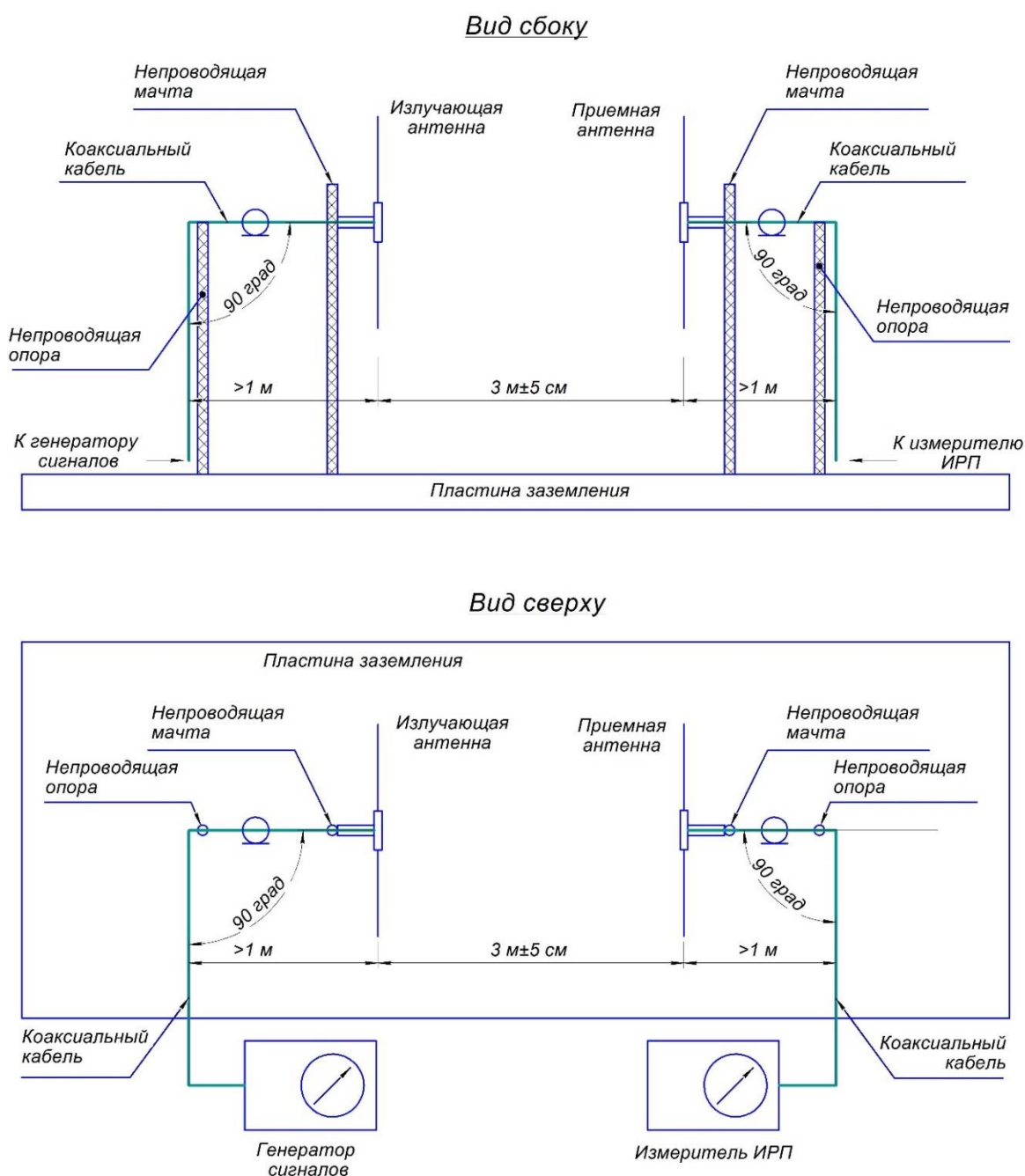


Рисунок 22 – Общая конфигурация испытательного оборудования в БЭК

Для обеспечения соответствия нормативной документации [8], [11] горизонтальная металлизированная поверхность БЭК должна соответствовать требованиям нормализованного затухания. Эта проверка

проводиться по методу дискретных частот. Начальные проверки затухания необходимо проводить для при горизонтальной ориентации приемо-передающих антенн, т.к. измерения при данном виде поляризации менее чувствительны, чем при вертикальной. В процессе исследований площадки БЭК для каждой выбранной частоты при соответствующей поляризации проводятся измерения уровня напряжения на выходе кабеля принимаемой антенны V_r . Первое значение V_{DIRECT} получается при отсоединении двух кабелей от приемной и передающей антенн и соединении их через коаксиальный переходной разъем. Другое показание V_{SITE} измеряют при подсоединенных к антеннам кабелей. В данном случае измеряется максимальный уровень сигнал при перемещении приемной антенны по высоте. В процессе проверки напряжение генератора сигнала V_r остается постоянным. Измеренные уровни V_{DIRECT} и V_{SITE} подставляются в формулу, которая позволяет вычислить нормализованное затухание A_N :

$$A_N = V_{DIRECT} - V_{SITE} - AF_T - AF_R - \Delta AF_{TOT}, \text{ (дБ)} \quad (22)$$

где AF_T и AF_R – антенные факторы излучающей и приемной антенн соответственно (дБ);

ΔAF_{TOT} (дБ) – коэффициент коррекции, применяемый для полуволновых вибраторов.

В соответствии с методологией на начальном этапе применяемые антенны ориентируются в горизонтальной поляризации (ГП). Фазовый центр излучающей антенны устанавливается на высоте от пола $h_1 = 2$ м (рисунок 23). Затем в процессе измерений, высоту приемной антенны h_2 изменяют в пределах от 1 м до 4 м. На каждой тестовой частоте, которая выбирается и таблицы 2, находится максимальный принимаемый сигнал приемной антенной, и V_{DIRECT} . Для определения нормализованного затухания A_N в частотном 30-180 МГц коэффициент ΔAF_{TOT} берется из таблицы 2.

Табличные и полученные в процессе измерений данные подставляются в формулу (22).

Таблица 2 - Данные для расчета нормализованного затухания

Частота, МГц	ΔAF_{TOT} (дБ) для ГП: $h_1 = 2$ м; $h_2 = 1 \div 4$ м	ΔAF_{TOT} (дБ) для ВП.	Диапазон высот h_2 , м	A_{Nm} для ГП	A_{Nm} для ВП
30	3,1	2,9	2,75-4	11	12,4
40	4,1	2,1	2,13-4	7	10,4
45	3,3	1,6	1,92-4	5,5	9,5
50	2,8	1,5	1,75-4	4,2	8,4
60	1	2	1,50-4	2,2	6,3
70	-0,4	1,5	1,32-4	0,6	4,4
80	-1	0,9	1,19-4	-0,7	2,8
90	-1	0,7	1,08-4	-1,8	1,5
100	-1,2	0,1	1-4	-2,8	0,6
120	-0,4	-0,2	1-4	-4,4	-0,7
140	-0,2	-0,2	1-4	-5,8	-1,5
160	-0,1	0,2	1-4	-6,7	-3,1
180	-0,9	0,4	1-4	-7,2	-4,5
200	-1,5	0,5	1-4	-8,4	-5,4
250	-1,8	-0,2	1-4	-10,6	-7
300	-1	-0,4	1-4	-12,3	-8,9
400	-	-	1-4	-14,8	-14
500	-	-	1-4	-17,3	-16,4
600	-	-	1-4	-19,1	-16,3
700	-	-	1-4	-20,6	-18,4
800	-	-	1-4	-21,3	-20
900	-	-	1-4	-22,5	-21,3
1000	-	-	1-4	-23,5	-22,4

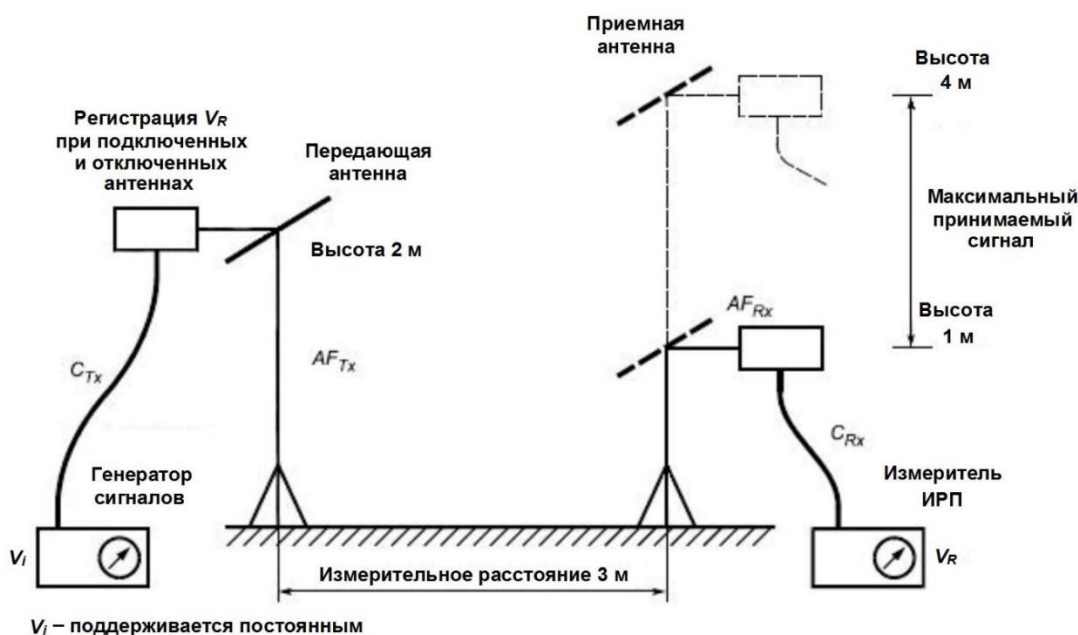


Рисунок 23 - Определение нормализованного затухания полубезэховой камеры для случая горизонтальной поляризации антенн

Определение нормализованного затухания для при вертикальной поляризации (ВП) антенны незначительно отличается от методики, применяемой для горизонтальной поляризации (рисунок 24). Антенны ориентируются в вертикальной поляризации. Высота передающая антенна устанавливается на уровне $h_1 = 2,75$ м от пола (рисунок 24). Затем в процессе измерений, высоту приемной антенны h_2 изменяют в соответствии со значениями таблицы 2. Минимальное расстояние приемной антенны не должен быть менее 25 см от пола. На каждой тестовой частоте находится максимальный принимаемый сигнал приемной антенной, и V_{DIRECT} . Табличные и полученные в процессе измерений данные подставляются в формулу (22).

Полубезэховая камера считается пригодной для проведения измерений помехоэмисии при сертификации, если разница между всеми полученными результатами нормализованного затухания A_N и теоретическими значениями затухания идеальной площадки A_{Nm} не превышают ± 4 дБ. В диапазон определен из условий полной погрешностью, которая является суммой

неопределенности результатов измерений 3 дБ и все составляющие погрешности несовершенства горизонтальной металлической площадки, в сумме равные 1 дБ.

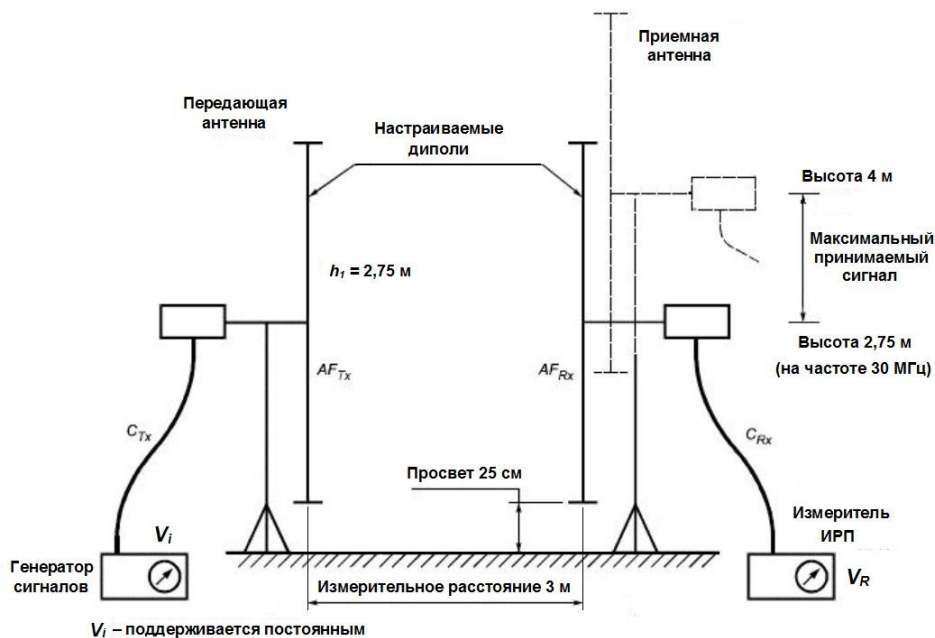


Рисунок 24 - Определение нормализованного затухания полубезэховой камеры для случая вертикальной поляризации антенн

При превышении разности ± 4 дБ между теоретическим и измеренным значениями нормализованного затухания полубезэховой камеры, следует проанализировать все составляющие и условия измерений. Проверяются параметры калибровки измерительного приемника и генератора сигналов и антенные факторы применяемых антенн. Далее проверяется нормализованное затухание на тех частотах, на которых имеется несоответствие. Причиной может быть ошибки проектирования БЭК: неправильный выбор и расположение радиопоглощающих элементов или неоптимальная конструкция металлической пластины. Несоответствия наиболее часто проявляются при измерении вертикальной поляризации, поэтому для их выявления целесообразно проводить проверки при данной ориентации приемо-передающих антеннах. С целью повышения заявляемого качества используемой БЭК можно дополнительно провести измерения

затухания на промежуточных частотах. Предложенный алгоритм определения параметров для расчета приведен ниже. Результаты аттестации полубезэховой БЭК при вертикальной и горизонтальной поляризации антенн и для высоты передающей антенны 1 м приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты аттестации полубезэховой БЭК при вертикальной поляризации антенн и для высоты передающей антенны 1 м

Частота, МГц	V_{DIRECT} , дБ	V_{SITE} , дБ	AF_T , дБ	AF_R , дБ	A_{nm} , дБ	A_N , дБ	Δ , дБ	Соответствие
30	98,79	53,02	20,2	20,3	8,2	5,3	-2,9	Да
40	98,00	66,31	15,0	14,7	5,8	2,0	-3,8	Да
50	97,50	74,14	11,6	11,4	4,0	0,4	-3,6	Да
60	97,37	79,64	9,4	9,1	2,6	-0,8	-3,4	Да
70	96,98	81,66	8,5	8,3	1,5	-1,5	-3,0	Да
80	96,81	82,77	8,6	8,4	0,6	-3,0	-3,6	Да
90	96,61	82,20	8,9	8,7	-0,1	-3,2	-3,1	Да
100	96,33	77,71	9,1	8,9	-0,7	0,6	1,3	Да
120	96,06	83,24	8,9	8,5	-1,5	-4,6	-3,1	Да
140	95,94	81,92	9,3	8,7	-1,8	-4,0	-2,2	Да
160	95,76	80,33	10,1	9,7	-1,7	-4,4	-2,7	Да
180	95,75	79,36	10,9	10,2	-1,3	-4,7	-3,4	Да
200	95,50	77,54	11,7	10,7	-3,6	-4,4	-0,8	Да
250	95,30	77,12	14,0	12,5	-7,7	-8,3	-0,6	Да
300	94,78	76,55	14,9	14,3	-10,5	-11,0	-0,5	Да
400	94,30	76,17	16,6	16,4	-14,0	-14,9	-0,9	Да
500	93,84	75,31	18,5	18,2	-16,4	-18,2	-1,8	Да
600	93,04	71,24	20,9	20,4	-16,3	-19,5	-3,2	Да
700	92,28	69,90	22,2	22,0	-18,4	-21,8	-3,4	Да
800	91,85	70,48	22,6	22,4	-20,0	-23,6	-3,6	Да
900	91,79	68,64	24,0	23,9	-21,3	-24,8	-3,5	Да
1000	91,71	67,71	24,9	24,8	-22,4	-25,7	-3,3	Да

Таблица 4 – Результаты аттестации полубезэховой БЭК при горизонтальной поляризации антенн и для высоты передающей антенны 1 м

Частота, МГц	V_{DIRECT} , дБ	V_{SITE} , дБ	AF_T , дБ	AF_R , дБ	A_{nm} , дБ	A_N , дБ	Δ , дБ	Соответствие
30	98,79	45,30	20,2	20,3	15,8	13,0	-2,8	Да
35	98,40	51,92	17,6	17,5	13,4	11,4	-2,0	Да
40	98,00	60,13	15,0	14,7	11,3	8,2	-3,1	Да
45	97,75	65,24	13,3	13,1	9,4	6,1	-3,3	Да
50	97,50	69,75	11,6	11,4	7,8	4,7	-3,1	Да
60	97,37	77,30	9,4	9,1	5	1,6	-3,4	Да
70	96,98	80,44	8,5	8,3	2,8	-0,3	-3,1	Да
80	96,81	80,31	8,6	8,4	0,9	-0,5	-1,4	Да
90	96,61	79,37	8,9	8,7	-0,7	-0,4	0,3	Да
100	96,33	80,04	9,1	8,9	-2	-1,7	0,3	Да
120	96,06	83,68	8,9	8,5	-4,2	-5,0	-0,8	Да
140	95,94	83,83	9,3	8,7	-6	-5,9	0,1	Да
160	95,76	83,42	10,1	9,7	-7,4	-7,5	-0,1	Да
180	95,75	82,09	10,9	10,2	-8,6	-7,4	1,2	Да
200	95,50	83,91	11,7	10,7	-9,6	-10,8	-1,2	Да
250	95,30	80,54	14,0	12,5	-11,7	-11,7	0,0	Да
300	94,78	77,56	14,9	14,3	-12,8	-12,0	0,8	Да
400	94,30	75,62	16,6	16,4	-14,8	-14,3	0,5	Да
500	93,84	74,18	18,5	18,2	-17,3	-17,0	0,3	Да
600	93,04	70,15	20,9	20,4	-19,1	-18,4	0,7	Да
700	92,28	70,83	22,2	22,0	-20,6	-22,8	-2,2	Да
800	91,85	67,68	22,6	22,4	-21,3	-20,8	0,5	Да
900	91,79	67,27	24,0	23,9	-22,5	-23,4	-0,9	Да
1000	91,71	68,17	24,9	24,8	-23,5	-26,2	-2,7	Да

Выбирается дополнительная частота для оценки. Все соответствующие коэффициенты для расчета затухания (таблица 2) пересчитываются с формулы помощью линейной интерполяции:

$$Y_i = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{f_{m2} - f_{m1}} \right) f_{mi} + \left(\frac{f_{m2} Y_1 - f_{m1} Y_2}{f_{m2} - f_{m1}} \right) \quad (23)$$

где Y_i – значения коэффициента ΔAF_{TOT} или теоретического значения нормализованного затухания идеальной площадки A_{Nm} , на частоте f_{mi} ;

Y_1 и Y_2 – табличные значения коэффициента ΔAF_{TOT} или теоретические значения нормализованного затухания идеальной площадки A_{Nm} соответствующие частотам f_{m1} и f_{m2} ;

f_{m1} и f_{m2} – табличные значения частот интерполируемого диапазона; f_{mi} – частота диапазона $[f_{m1}; f_{m2}]$ где будет проводиться дополнительная оценка нормализованного затухания.

Пример расчета. Требуется произвести дополнительную оценку при аттестации БЭК нормализованного затухания на частоте 71. Из таблицы 2 видно, что частота $f_{mi} = 71$ МГц лежит в диапазоне частот 70 – 80 МГц. Соответственно $f_{m1} = 70$ МГц, а $f_{m2} = 80$ МГц. Для горизонтальной поляризации находим: $\Delta AF_{TOT1} = -0,4$ дБ (для 70 МГц); $\Delta AF_{TOT2} = -1$ дБ (для 80 МГц). Подставляем эти значения в формулу (23) и находим ΔAF_{TOTi} для частоты 71 МГц=0,46 дБ.

Из таблицы 2 для вертикальной поляризации находим: $\Delta AF_{TOT1} = 1,5$ дБ (для 70 МГц); $\Delta AF_{TOT2} = 0,9$ дБ (для 80 МГц). Подставляем эти значения в формулу (23) и находим ΔAF_{TOTi} для частоты 71 МГц=1,44 дБ.

Для горизонтальной поляризации находим: $A_{Nm1} = 0,6$ дБ (для 70 МГц); $A_{Nm2} = -0,7$ дБ (для 80 МГц). Подставляем эти значения в формулу (23) и находим A_{Nmi} для частоты 71 МГц= 0,47 дБ.

Для вертикальной поляризации находим: $A_{Nm1} = 4,4$ дБ (для 70 МГц); $A_{Nm2} = 2,8$ дБ (для 80 МГц). Подставляем эти значения в формулу (23) и находим A_{Nmi} для частоты 71 МГц= 4,24 дБ.

В соответствии с методикой была произведена оценка полубезэховой БЭК ООО «ЕвразэсТест», для сертификации НКУ. Результаты аттестации приведены ниже в таблицах.

В соответствии с измеренными данными и рассчитанными результатами, видно, что полубезэховая камера соответствует требованиям ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 по параметру нормализованного затухания и может быть использована для измерения помехоэмиссии от изделий при проведении сертификационных испытаний.

2.9 Совершенствование методики аттестации безэховой камеры для проведения сертификационных испытаний на восприимчивость к электромагнитному излучению

Для проведения сертификационных испытаний изделий в части оценки их восприимчивости к электромагнитному полю в диапазоне частот от 80 МГц до 1000 МГц на соответствие требованиям [7] необходимо подтверждение способности создания в БЭК электромагнитного воздействия заданного уровня. Для проведения испытаний на восприимчивость предложена методика, позволяющая аттестовать испытательный комплекс с учетом оптимизации применяемого оборудования. Для проведения аттестации необходимо наличие генератора сигналов, усилителя мощности, широкополосного датчика и полеобразующую систему в виде излучающей антенны, а также модифицированную полубезэховую камеру диапазона частот 30 МГц – 6 ГГц. Общая конфигурация испытательного комплекса приведена на рисунке 25, где поясняется принцип испытаний методом свободного поля для расстояния 1 м между полеобразующей системой и датчиком.

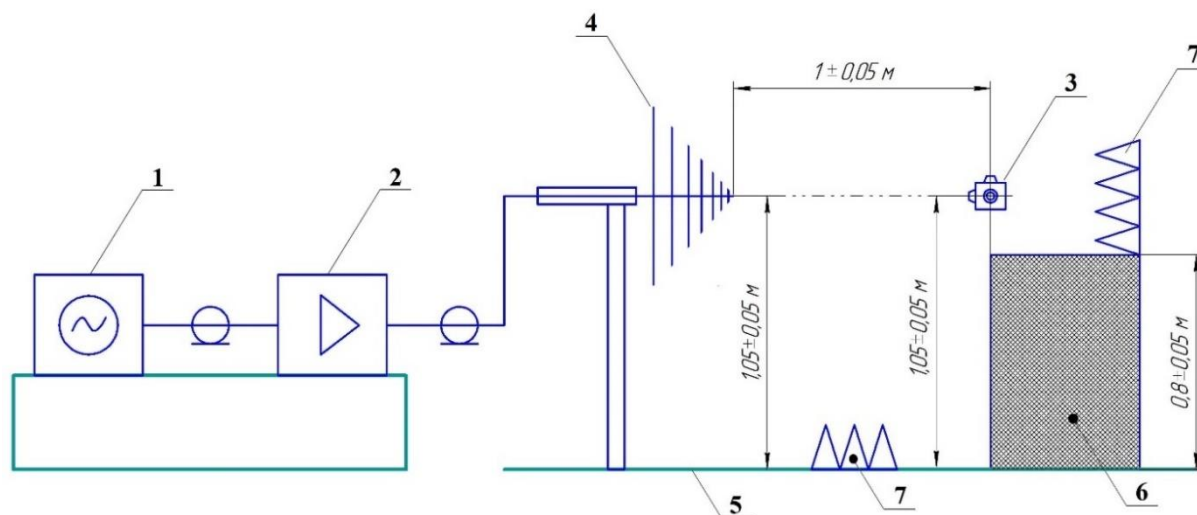


Рисунок 25 – Общая конфигурация испытательного комплекса с излучающей логопериодической антенной для испытаний на восприимчивость к электромагнитному полю (БЭК не показана):

- 1 - генератор; 2 - усилитель мощности; 3 - датчик; 4 - излучающая антенна;
5 - пластина заземления; 6 - испытательный стол из диэлектрического материала; 7 - РПМ

При аттестации комплекса проверяется способность создания заданного уровня электромагнитного поля, т.е. осуществляется калибровка. При ее проведении высота фазового центра излучающей антенны устанавливается $1,05 \pm 0,05$ м по отношению к горизонтальной поверхности. В диапазоне частот 80 – 1000 МГц для установки широкополосного датчика применяется стол из диэлектрического материала высотой $0,8 \pm 0,05$ м, который позиционируется по отношению к полеобразующей излучающей логопериодической антенне на ближнем краю стола на высоте от пола $1,05 \pm 0,05$ м.

Расстояние от полеобразующей излучающей логопериодической антенны до широкополосного датчика выбирается в диапазоне от $1 \pm 0,05$ м до $3 \pm 0,05$ м.

Калибровка электромагнитного излучения проводится для условий свободного поля при вертикальной и горизонтальной поляризациях полеобразующей излучающей логопериодической антенны.

Основное назначение испытательного комплекса для условий свободного поля является его применение для сертификационных испытаний

изделий на восприимчивость/помехоустойчивость с уровнем воздействия поля до 10 В/м. Данное значение соответствует третьей степени жесткости, которая в свою очередь соответствует третьему классу электромагнитной обстановки, характерной для типовой промышленной среды.

В процессе аттестации полеобразующего комплекса должна быть продемонстрирована способность создания испытательного воздействия с требуемой напряженностью. При калибровке формируется массив значений параметров испытательного оборудования, позволяющих провести сертификационные испытания изделий на восприимчивость к внешним электромагнитным воздействиям.

Особенностью предлагаемого подхода является аттестация комплекса без применения измерительных ваттметров, которые при типовых измерениях устанавливаются на выход усилителя мощности и измеряют параметры падающей и отраженной волн. Методика реализует подход при известном согласовании выходных и входных сопротивлений усилителя и излучающей антенны, сопоставления уровня измеряемого поля в контрольной точке по уровню сигнала с генератора. Т.е. при известных откалиброванных значениях выходного уровня сигнала генератора и измеренного уровня электромагнитного поля в последующих тестах для создания заданной напряженности используется только массив данных показаний генератора сигналов.

Для обеспечения актуальности калибровочных значений испытательного комплекса необходимо выполнять условия идентичности параметров для условий калибровке испытаний изделий.

При калибровке электромагнитного поля и последующих тестов важно обеспечивать точное позиционирование фидеров. С целью минимизации затухания и потерь сигнала длина фидеров, соединяющих генератор высокочастотных сигналов и усилитель мощности, а также усилитель мощности и полеобразующую систему выбирается не более 3 м.

Для обеспечения минимизации погрешности формирования уровня напряженности в заданной области пространства погрешность отклонения позиционирования широкополосного датчика по каждой из осей не должна быть не более 5 см.

Калибровка уровня электромагнитного воздействия проводится в отсутствие тестируемого изделия, методом калибровки при постоянной напряженности поля «Метод замены» без низкочастотной модуляции несущей частоты воздействия. Формирования массива калибровочных данных проводится в соответствии с алгоритмом:

- определяется и задается рабочий диапазон частот, например, 80 – 1000 МГц;
- задается, исходя из требований по необходимой степени жесткости, уровень электромагнитного воздействия, например 3 или 10 В/м;
- подсоединяется все задействованное испытательное оборудование;
- задается начальная несущая частота;
- по показаниям широкополосного датчика устанавливается заданный уровень напряженности электромагнитного воздействия (В/м);
- регистрируется и вносится в базу данных на заданной несущей частоте уровень сигнала с задающего генератора;
- производится перестройка в сторону увеличения несущей частоты на задающем генераторе;
- последовательно выполняются пункты предыдущие пункты до тех пор, пока не будет произведена калибровка электромагнитного воздействия до верхней заданной несущей частоты включительно.

Зафиксированные на всех несущих частотах уровни сигналов с задающего генератора определяют массив калибровочных данных тестового электромагнитного поля.

Для обеспечения гарантированного уровня воздействия проведение процедуры калибровки должно обеспечивать более жесткие требования на

погрешность задания напряженности испытательного электромагнитного поля, и исходя из результатов исследования, задается в пределах от 0 до 4 дБ.

При проведении аттестации применяемой БЭК для сертификационных испытаний на восприимчивость к электромагнитному воздействию, было доказано соответствие БЭК требованиям ГОСТ 30804.4.3-2013 (таблица 5).

Таблица 5 – Таблица калибровок для тестов на восприимчивость

Частота, МГц	Напряженность поля, В/м		Соответствие ГОСТ 30804.4.3
	Вертикальная поляризация	Горизонтальная поляризация	
80	10,5	10,6	Да
90	10,2	10,4	Да
100	10,4	10,4	Да
110	10,2	10,5	Да
120	10,3	10,6	Да
130	10,5	10,5	Да
140	10,9	10,6	Да
150	10,8	10,6	Да
160	10,6	10,3	Да
170	10,6	10,8	Да
180	10,5	10,8	Да
190	10,4	10,2	Да
200	10,7	10,6	Да
210	10,9	10,4	Да
220	10,8	10,6	Да
230	10,9	10,4	Да
240	10,9	10,8	Да
250	10,8	10,6	Да
260	10,8	10,6	Да
270	10,7	10,8	Да
280	10,6	10,9	Да
290	10,5	10,7	Да
300	10,8	11,0	Да

Продолжение таблицы 5

Частота, МГц	Напряженность поля, В/м		Соответствие ГОСТ 30804.4.3
	Вертикальная поляризация	Горизонтальная поляризация	
350	11,2	11,4	Да
400	11,0	11,1	Да
450	11,2	11,2	Да
500	11,2	11,3	Да
550	11,4	11,2	Да
600	10,4	11,6	Да
650	10,5	11,5	Да
700	10,8	10,4	Да
750	10,3	11,9	Да
800	11,1	10,8	Да
850	11,2	11,3	Да
900	10,9	10,3	Да
950	11,2	11,4	Да
1000	11,4	11,2	Да

Выводы по разделу 2. Предложены пути совершенствования экспериментальной базы для обеспечения качества сертификационных испытаний. Сформулированы необходимые требования к лаборатории, работающему персоналу, условиям окружающей среды, тестируемым изделиям и испытательному оборудованию. Разработаны требования к качеству проводимых испытаний. Предложена методика внутренней периодической проверки измерительного тракта при ЭМС испытаниях на помехоэмиссию с применением широкополосного излучающего генератора. Произведен выбор и дано обоснование оптимальной конструкции безэховой камеры для проведения испытаний на электромагнитную совместимость, в соответствии с которым обосновано применение камер третьего класса прямоугольной конструкции. Даны рекомендации по реализации оптимальной измерительной площадке.

3 Экспериментальные исследования низковольтного комплектного устройства

3.1 Исследование низковольтного комплектного устройства в рамках требований ТР ТС 004/2011

Первоначальной поверкой на соответствие положениям технического регламента 004/2011 является визуальный осмотр. В данной части проведена проверка на соответствие требованиям к маркировке по ГОСТ ИЕС 61439-1 [10]. Произведена визуальная идентификация исследуемых образцов, которая проводилась на основании информации, нанесенной на закрепленную табличку, установленную на лицевую часть НКУ. На паспортной табличке НКУ была приведена следующая информация: ООО «ИНБРЭС» Шкаф контроллеров телемеханики ИНБРЭС-ШТМ Зав.№:2021-ШТМ-038. Дата изготовления 11.11.2022. ГОСТ ИЕС 61439-1-2013.

В ходе визуального осмотра и анализа, проверено полное соответствие требованиям к эксплуатационным документам и показателям, соответствие конструктивных элементов по ГОСТ ИЕС 61439-1. В приложенной технической документации производителя НКУ достаточно полно отражены общие технические характеристики, необходимые условия монтажа и эксплуатации, а также регламентного технического обслуживания НКУ и входящих в него систем.

Дальнейшие исследования касались проверки степени защиты НКУ от попадания пыли и воды [14], [40]. Цель данных исследований - обеспечение безопасности при воздействии данных факторов в процессе эксплуатации. НКУ по технической документации имеет обозначение IP «5х». Поэтому исследование проходило в камере пыли (рисунок 26). НКУ в течении двух часов подвергся воздействию пыли в специализированной камере КП-ЕТ-05. После был произведен визуальный осмотр и анализ с выводом об отсутствии

проникновения пыли внутрь корпуса, что говорит о достаточной защищенности изделия.

Проверка НКУ на герметичность к попаданию воды проведена на специализированной дождевальной установке (рисунок 27). Так как НКУ имеет вторую цифру IP «Х4», то соответственно изделие подвергалась исследованию на специализированной дождевальной установке, имеющей поворотный выходной патрубков. В течении пяти минут на все стороны НКУ подавалось водяное воздействие в виде дождя при расходе 10 л/мин. После был произведен визуальный осмотр и анализ с выводом об отсутствии проникновения воды внутрь корпуса, что говорит о достаточной защищенности по данному параметру испытуемого изделия.



Рисунок 26 – Общий вид установки при исследовании НКУ к воздействию пыли

Исследование на электрическую прочность изоляции. Испытания проводились на пробойной установке типа УПУ-10 (рисунок 28). В соответствии с требованиями изоляция должна выдерживать номинальное

напряжение 2 кВ в течении 1 минуты [10, 37, 39]. Проведенные исследования показали достаточную надежность применяемой в НКУ. Вывод сделан на основании отсутствия ее пробоя.



Рисунок 27 – Исследование НКУ на герметичность к попаданию воды



Рисунок 28 – Проверка электрической прочности изоляции

Номинальное сечение проводников. Измерение данного параметра образца проверяется универсальным поверенным измерительным инструментом типа штангенциркуль ШЦЦ-1 (рисунок 29). Проведены выборочно измерения диаметра одной жилы в многопроволочном проводнике и вычислена его площадь. Далее умножив количество проводников на площадь одиночного проводника, определена суммарная площадь сечения, равная 4 мм^2 , что соответствует требованиям стандарта.



Рисунок 29 – Измерение номинального сечения электрических проводников

Следующий этап испытаний направлен проверкой на проверку эффективности непрерывной цепи заземления между открытыми токопроводящими частями НКУ и защитной цепью [10], [41]. Данный параметр проверяется как эффективность подсоединения к электрическому зажиму для подводящего внешнего защитного электропроводника. Сопротивление электрической цепи должно быть не более 0,1 Ом.

Испытания проводились с применением источника питания постоянного тока MP3030, с токоотдачей не менее 10 А (рисунок 30). Методология испытаний заключается в закреплении контактов испытательного прибора на открытую проводящую часть и на зажим для внешнего защитного проводника и задании требуемых значений напряжения и тока и по закону Ома было рассчитано сопротивление, составляющее 0,065 Ом, что соответствует требованиям.



Рисунок 30 – Определение эффективности непрерывности электрической цепи заземления НКУ и защитной цепью

Исследования на предельные значения превышения температуры. Суть данных тестов заключается в способности НКУ и его цепей пропускать номинальные токи в заданных условиях с учетом параметров встроенных элементов, их расположения и назначения, без превышения предельно-

допустимых температурных параметров [10]. При превышении температуры предельного уровня не должны происходить повреждения токоведущих и соседних с ними частей НКУ.

Тестирование НКУ проводится при его подключении в испытательную электрическую цепь с одновременной нагрузкой всех электрических цепей, используемых в сертифицируемом образце и измерении температур термопарой.

В процессе эксперимента НКУ был установлен в соответствии с условиями расположения нормальной эксплуатацией, и в том числе с установленными на место крышками (рисунок 31). К образцу были присоединены электрические проводники сечения 4 мм². На испытательной установке задавался максимально-допустимый ток, определяемый в технической документации производителя (рисунок 32).

Испытание проведено в течение времени достаточного для установления стабильной температурной среды. В испытательной практике данное условие считается выполненным, если градиент температуры во всех определенных тест-планом точках измерения, включая температуру окружающего воздуха, не превышает 1°С/ч.

Измерительные термопары во время тестов дополнительно защищаются от потоков воздуха и внешнего теплового излучения.

Температура измеряется в тех точках, где возможно превышение предельно-допустимого уровня температуры, включая места соединения электрических проводников и зажимов токоведущих цепей.

По результатам тестов превышение температуры не превысило установленных значений. Работоспособность НКУ была в пределах номинальных параметров, что соответствует нормативным техническим требованиям.

Схема соединения стэнда проверки НКУ на превышение температур с однофазным трансформатором

Принципиальная схема соединения трансформаторов к НКУ

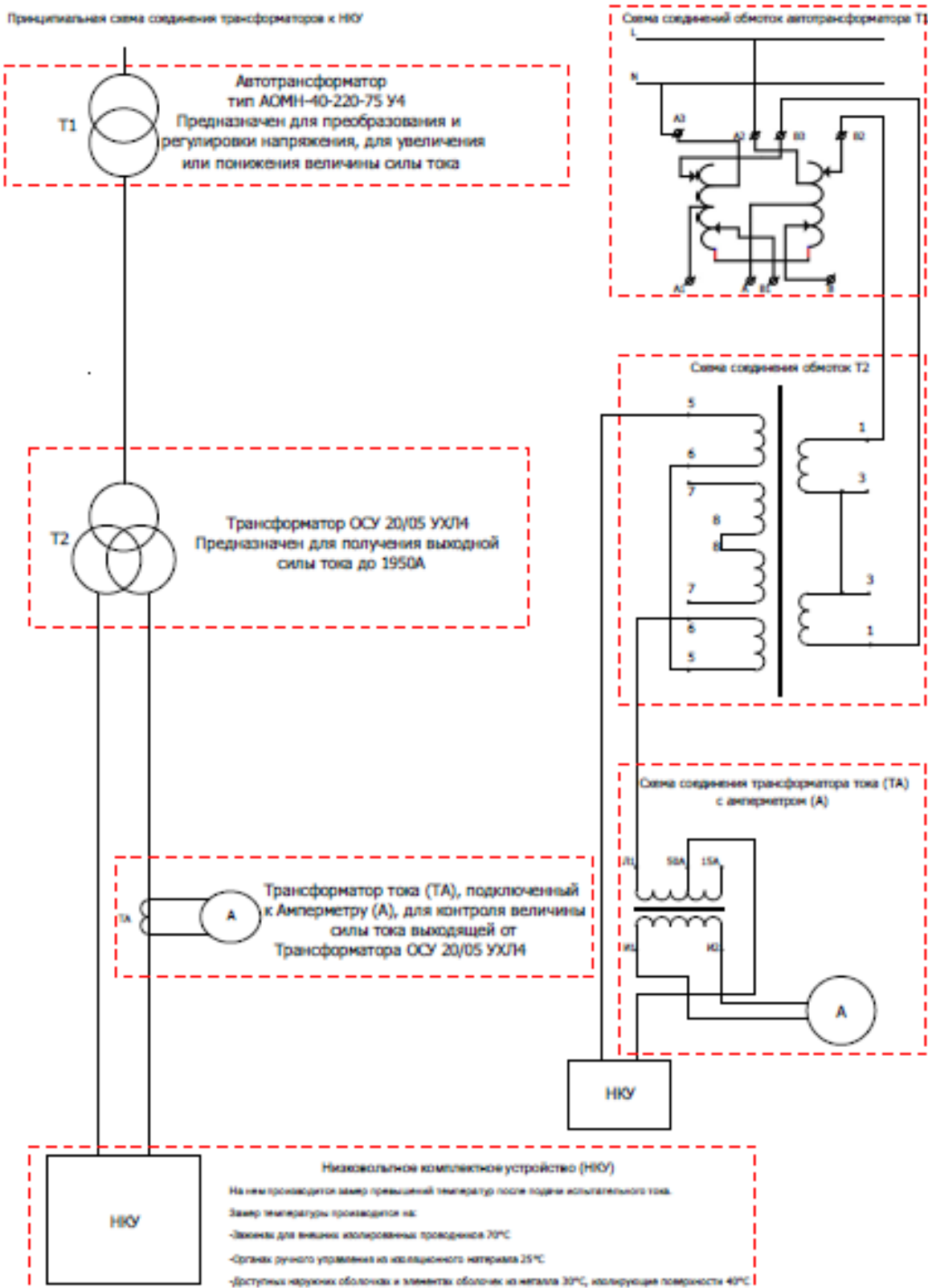


Рисунок 31 – Принципиальная схема установки для проверки НКУ на превышение температур с применением однофазного трансформатора



Рисунок 32 – Тест на превышение температуры

Устойчивость к импульсному напряжению. Каждая цепь НКУ взятая в отдельности должна выдерживать импульсные напряжения. Изоляционные промежутки от токоведущих до наружных токопроводящих участков частей, а также между проводящими участками разных потенциалов должны выдерживать испытательные напряжения с фронтами нарастания и спада $1,2/50$ мкс, с уровнем 6 кВ. НКУ подключается в испытательную сеть и источник генерирует три положительных и три отрицательных разряда в каждый воздушный зазор относительно заземленного корпуса. Во время теста не наблюдалось пробоев искровых промежутков и срабатывания защитного реле, что соответствует положительному результату.

3.2 Исследование низковольтного комплектного устройства на излучаемую помехоэмиссию

Для обеспечения безопасной эксплуатации НКУ на производстве необходимо подтверждение ее требованиям ЭМС. Так как в состав НКУ входят различные электротехнические устройства и системы, то соответственно она является источником излучения. Даже если НКУ не генерирует мощного электромагнитного излучения, но совокупности с прочими излучателями электромагнитных помех, суммарное электромагнитное поле может оказать воздействие на штатное функционирование сторонних промышленных систем. В данном контексте проблем помехоэмиссии адекватно придерживаться концепции приемлемого риска, которая базируется на оптимальном соотношении двух параметров «польза/затраты» [24].

В соответствии с обозначенной концепцией, при помещении НКУ в некоторую замкнутую область, то изменение в сторону возрастания ЭМС риска адекватно описать выражением

$$P_{\text{ЭМС}} = \frac{P_{\text{НКУ}}}{P_{\phi}}, \quad (24)$$

где $P_{\text{НКУ}}$ – риск нарушения работоспособности систем в некоторой области при создании излучения от НКУ;

P_{ϕ} – имеющийся ЭМС риск из-за общего фона излучения в данной области пространства.

С учетом базирования текущих рассуждений, $P_{\text{НКУ}}$ должно не превышать некоторого установленного предела P_{lim} . Очевидно, что условие равновесия по фактору создаваемого НКУ электромагнитного излучения будет выражено в виде:

$$P_{\text{lim}} \leq P_{\text{НКУ}} \leq P_{\phi}. \quad (25)$$

Соответственно, сформулированную в [24] теорему, адекватно применить к системе НКУ: для группы N_1 , состоящей из независимых ЭМС рецепторов и группы НКУ K_1 при увеличении количества N_1 до N_2 и (или) K_1 до K_2 для обеспечения ЭМС равновесия, необходимо обеспечение условия

$$P_{НКУ} \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{K_2} P_{ik} \leq P_{\text{lim}}. \quad (26)$$

Физический смысл данной теоремы заключается в увеличении суммарного количества ЭМС рецепторов и НКУ в некоторой замкнутой области, что приводит к требованию ужесточения уровня излучаемых помех.

При рассмотрении вопросов обеспечения электромагнитной безопасности систем от электромагнитного излучения, создаваемого работающей в некоторой области пространства НКУ, необходимо рассматривать ее точки зрения «пороговой» ЭМС концепции [25]. Очевидность данного подхода вытекает из того, что при поглощении техническими системами излученного от НКУ энергии, ее количества не хватит их термического, а также электромеханического вывода из строя. Соответственно при определении предельно-допустимых пределов, определяющих приемлемый риск справедливо руководствоваться действующей нормативной документацией, например, ГОСТ 30805.22-2013 [11] или ГОСТ CISPR 14-1-2015 [12].

В области ЭМС взаимодействия НКУ с другими внешними системами приемлемый риск исходит из условий соответствия заданному предельному уровню напряженности электрической составляющей излучения, генерируемого одной НКУ для дальней зоны свободного пространства. С учетом испытаний НКУ в БЭК при измерительном расстоянии 3 м между приемной антенной и НКУ, требования к предельно-допустимому значению, представляются кусочно-непрерывной функцией в случае применения квазипикового детектора:

$$E_{\text{lim}} = \begin{cases} 40 \text{ дБ(мкВ / м)}; f \in [30; 230) \text{ МГц} \\ 40 \text{ дБ(мкВ / м)}; f \in [230; 1000) \text{ МГц} \end{cases} \quad (27)$$

В рамках обеспечения концепции приемлемого ЭМС риска, в рамках сертификационных на электромагнитную безопасность испытаний оценку НКУ адекватно проводить по формуле (27).

Основной вопрос при комплексной проверке соответствия требованиям помехоэмиссии НКУ ставится выбор оптимизации углового позиционирования тестируемого устройства в азимутальной плоскости по отношению к приемной антенне. Согласно теории электромагнитного излучения любая электрическая система является излучающей антенной, со сложной диаграммой направленности и амплитудно-частотной характеристикой. Если задать большой шаг, то есть большая вероятность пропустить те угловые позиции, при которых НКУ является эффективной излучающей антенной. При выборе малого шага углового позиционирования длительность проведения измерений будет необосновано долгим.

Оценим выбор углового шага азимутального позиционирования НКУ со стороны теории радиолокации. В соответствии с предложенным подходом любая радиолокационная цель будет характеризоваться параметром эффективной площади рассеяния, который показывает отражающие свойства объекта. Если габаритные размеры цели много больше, чем длины волн зондирующих радиолокационных частот, то диаграмма направленности эффективной площади рассеяния имеет сложный изрезанный характер. В этом случае угловая ширина ее лепестков диаграммы может достигать значений 5 град. Если габаритные размеры объекта соразмеримы с длиной волны зондирующей частоты, то средняя ширина диаграммы на данной частоте будет равна 60 град [2], [26], [42].

Проведем оценку вероятной угловой ширины диаграммы направленности НКУ, которая в части геометрических размеров представляет параллелепипед со сторонами 0,6×0,6×0,25 м. В соответствии с [10]

помехоэмиссия измеряется в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц, а нормы в соответствии с [12]. Верхняя частота соответствует длине электромагнитной волны 30 см. Видно, что габаритные размеры тестируемого оборудования соизмеримы с минимальной длиной волны измеряемого излучения. Соответственно адекватно принять значение лепестков ширины диаграммы направленности у НКУ равным 60 град. Для гарантированного перекрытия направления приема антенны и излучения помехоэмиссии от НКУ, примем угловой шаг азимутального позиционирования равный $\alpha=60/2=30$ град. Отсюда, произведя несложные расчеты, получим. Что измерения помехоэмиссии представленного НКУ должно осуществляться при двенадцати положениях по отношению к измерительной антенны.

Общий вид расположения тестируемой НКУ по отношению к приемной антенне в БЭК приведен на рисунке 33.



Рисунок 33 – Общий вид расположения тестируемой НКУ по отношению к приемной антенне в БЭК

Проведенные измерения для расстояния 3 м, показали соответствие НКУ требованиям помехоэмисии, что говорит о положительно пройденном сертификационном тесте. Запас по уровню составляет 12 дБ. На рисунке 34 приведен график излучаемых помех от НКУ в азимутальной плоскости. Для наглядности на представленном рисунке показан диапазон частот 30-180 МГц, в котором излучение максимально. Конкретная реализация амплитудно-частотной характеристики помех от НКУ приведена на рисунке 35 для азимутального угла 90 град.

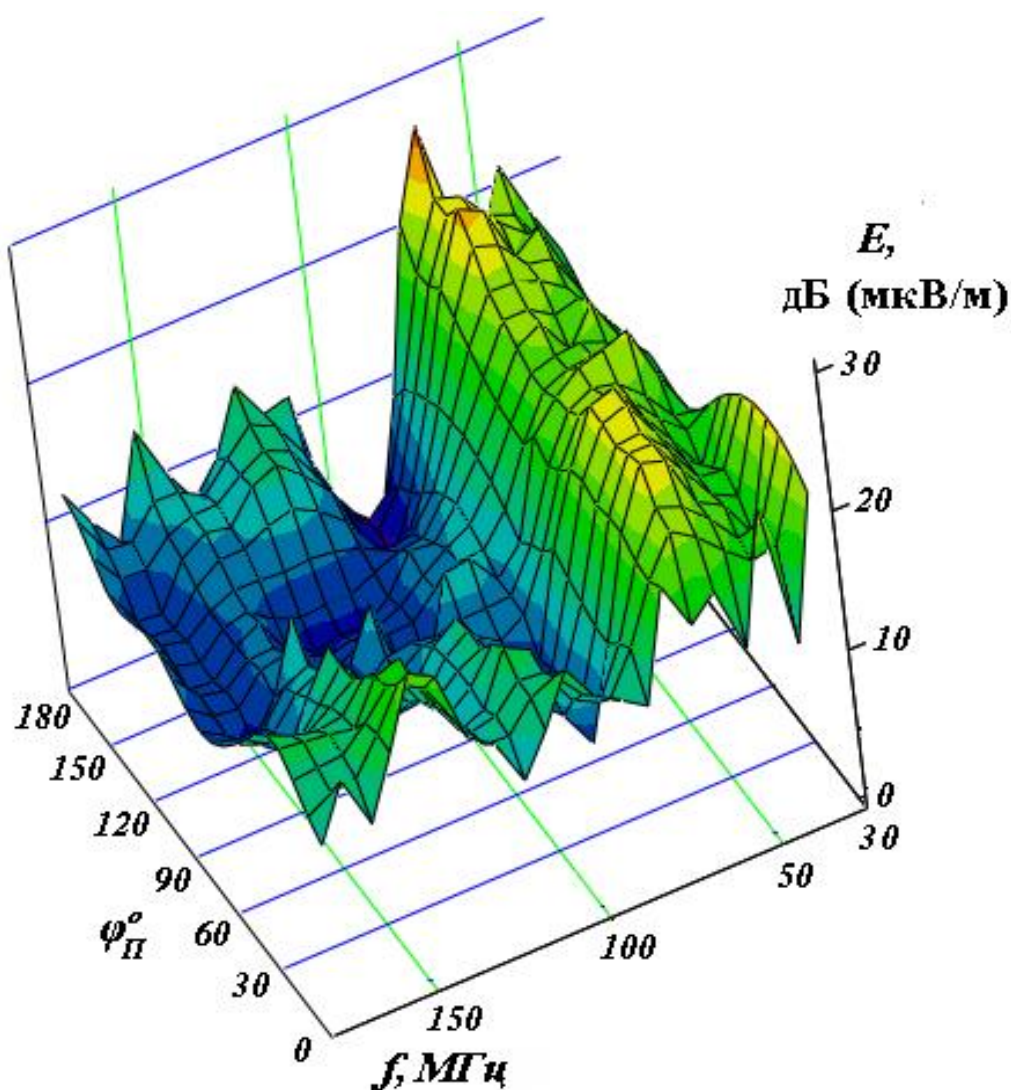


Рисунок 34 – Уровень излучаемых помех от НКУ в азимутальной плоскости

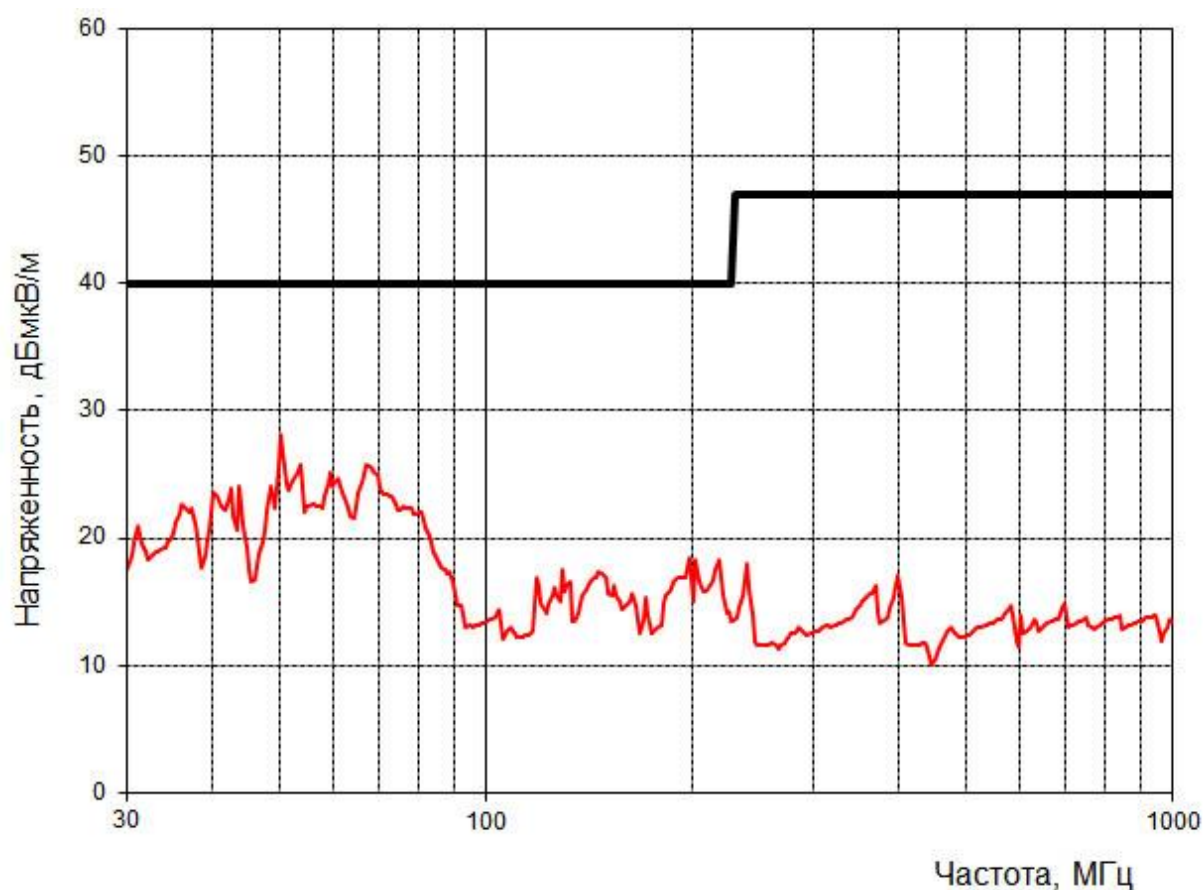


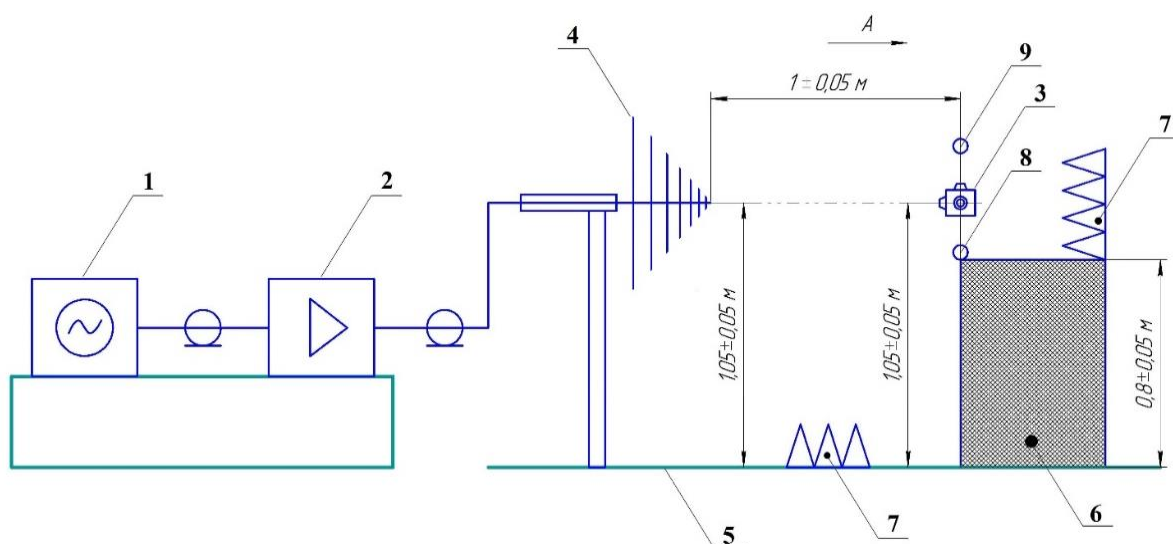
Рисунок 35 – Спектральная характеристика излучаемых помех для азимутального угла 90 град

3.3 Исследование низковольтного комплектного устройства на восприимчивость к электромагнитному излучению

Перед началом испытаний на восприимчивость необходимо проверить неоднородность электромагнитного поля в испытательной области. Эта процедура необходима обеспечения достоверности результатов тестирования. Ее суть заключается проверке способности испытательного оборудования генерировать испытательное электромагнитное излучение с заданной напряженностью в плоскости однородного поля.

Для конфигурации проведения измерений параметров однородности позиционирование датчика поля осуществляется в соответствии с рисунком 36. Датчик при измерениях последовательно располагается в четырех точках (местах позиционирования) в вертикальной плоскости относительно

излучающей антенны, образуя квадрат со сторонами 0,5 м. Центр симметрии данного квадрата расположен от пластины заземления на высоте 1,05 м и на расстоянии от 1 до 3 м от излучающей антенны. Погрешность отклонения позиционирования датчика по каждой из осей в любом из четырех мест установки не должна превышать 2 см.



Вид А
(Радиопоглощающий материал не показан)

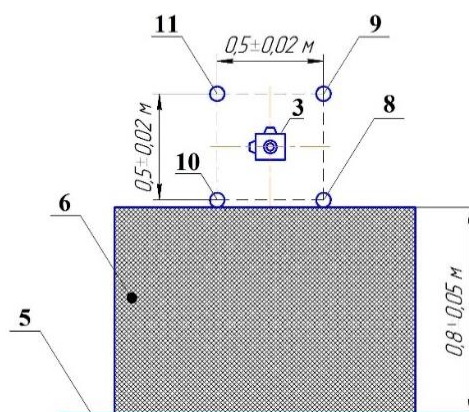


Рисунок 36 – Позиционирование датчика для определения однородности поля при расстоянии 1 м: 1 – генератор сигналов; 2 – усилитель мощности; 3 – датчик; 4 – излучающая антенна; 5 – пластина заземления; 6 – испытательный стол из диэлектрического материала; 7 – РПМ; 8 - контрольная точка №1 плоскости однородного поля; 9 – контрольная точка №2 плоскости однородного поля; 10 – контрольная точка №3 плоскости однородного поля; 11 – контрольная точка №4 плоскости однородного поля

Оценка однородности электромагнитного излучения проводится в отсутствие испытуемого образца. Для корректности показаний датчика поля, модуляция несущей в процессе определения однородности поля не осуществляется. Алгоритм оценки однородности осуществляется по следующей схеме:

- задается рабочий частотный диапазон (для данных тестов 80 – 1000 МГц);
- подключается все необходимое оборудование;
- для создания напряженности поля применяются значения мощности, полученные в процессе калибровки уровня электромагнитного поля;
- устанавливается начальная частота рабочего диапазона частот;
- на генераторе сигналов устанавливается уровень выходного сигнала, который соответствует калибровочному значению поля для заданной частоты;
- датчик устанавливается в точку (место позиционирования) №1;
- измеряется уровень электрической составляющей напряженности электромагнитного излучения (В/м);
- датчик поля последовательно устанавливается в других точках: №2, №3 и №4 и в каждой проводится измерения уровня излучения (по аналогии с предыдущим пунктом);
- частота сигнала генератора увеличивается на заданный шаг перестройки от предыдущего значения частоты;
- выполняются предыдущие пункты до верхней рабочей частоты заданного диапазона частот.

Измеренные данные составляют массив для оценки однородности поля, которая определяется по следующей процедуре:

- на каждой частоте из четырех значений напряженности электромагнитного поля, измеренных в соответствующих четырех точках, выбирается минимальное значение E_{\min} ;

- на каждой частоте из четырех значений напряженности электромагнитного поля, измеренных в соответствующих четырех точках, выбирается максимальное значение E_{\max} ;
- для каждой частоты производится сравнение максимального E_{\max} и минимального значений E_{\min} ;
- критерием обеспечения однородности является условие:

$$0 \text{ дБ} \leq L \leq 6 \text{ дБ}, \quad (28)$$

где

$$L=20 \cdot \lg(E_{\max}/E_{\min}). \quad (29)$$

Допускается отклонение не более плюс 10 дБ для 3% частот, проверяемых при испытаниях. Перед проведением тестов на восприимчивость была проведена в соответствии с данной методикой оценка однородности. Ее результаты представлены в таблице 6.

Рассуждая по аналогии с испытаниями на помехоэмиссию, шаг углового азимутального позиционирования в данных тестах выбран 30 град. Тестирование, представленной на сертификационные испытания НКУ, проводилось в безэховой камере ООО «ЕвразэсТест» (рисунок 37).

Проведенные испытания представленной НКУ на соответствие ГОСТ 30804.4.3-2013 при обоснованно выбранном азимутальном шаге позиционирования [26], не выявили нарушений работоспособности. Соответственно изделие имеет достаточную помехозащищенность, что гарантирует его электромагнитную надежность в эксплуатации.

Таблица 6 - Определение однородности напряженности излучения

Частота, МГц	Напряженность электромагнитного поля, В/м				E _{ном} , В/м	Предельное значение из четырёх позиций L, дБ		Соответствие
	Поз.1	Поз.2	Поз.3	Поз.4		L(E _{min})	L(E _{max})	
80	11,9	11,8	11,4	11,7	10	1,1	1,5	Да
90	11,0	11,4	11,9	10,9	10	0,8	1,5	Да
100	11,4	11,2	11,5	11,1	10	0,9	1,2	Да
110	11,3	10,7	10,9	11,2	10	0,6	1,0	Да
120	11,7	11,5	11,6	11,3	10	1,1	1,3	Да
130	11,3	11,2	12,0	11,6	10	1,0	1,6	Да
140	12,0	12,0	11,4	12,0	10	1,2	1,6	Да
150	12,7	12,5	11,5	12,5	10	1,2	2,1	Да
160	11,4	11,2	11,0	10,6	10	0,5	1,1	Да
170	10,9	11,1	11,1	11,2	10	0,8	1,0	Да
180	11,7	11,2	10,9	11,7	10	0,7	1,4	Да
190	12,1	12,0	11,5	12,0	10	1,2	1,7	Да
200	12,2	12,2	11,6	12,8	10	1,3	2,1	Да
210	12,7	12,8	11,7	13,3	10	1,4	2,5	Да
220	12,3	11,0	12,0	12,1	10	0,8	1,8	Да
230	11,3	11,8	11,7	12,4	10	1,1	1,8	Да
240	11,5	12,3	12,9	11,8	10	1,2	2,2	Да
250	11,7	11,5	12,9	12,7	10	1,2	2,2	Да
260	12,1	11,7	11,6	11,4	10	1,1	1,6	Да
270	12,2	11,1	11,8	11,6	10	0,9	1,7	Да
280	11,1	12,8	13,0	11,9	10	0,9	2,3	Да
290	12,5	12,5	11,8	13,0	10	1,4	2,3	Да
300	10,2	10,5	11,0	10,7	10	1,1	2,1	Да
300	10,3	10,8	12,1	11,9	10	0,2	1,6	Да
350	11,8	12,0	12,9	11,0	10	0,8	2,2	Да
400	11,0	11,6	12,3	11,7	10	0,8	1,8	Да
450	11,5	10,7	12,9	10,7	10	0,6	2,2	Да
500	10,9	11,4	12,6	12,0	10	0,7	2,0	Да

Продолжение таблицы 6

Частота, МГц	Напряженность электромагнитного поля, В/м				$E_{ном}$, В/м	Предельное значение из четырёх позиций L, дБ		Соответствие
	Поз.1	Поз.2	Поз.3	Поз.4		L(E_{min})	L(E_{max})	
550	11,5	11,9	12,8	12,2	10	1,2	2,2	Да
600	12,1	12,4	13,4	12,6	10	1,6	2,5	Да
650	11,5	12,1	12,9	12,1	10	1,2	2,2	Да
675	11,5	12,2	12,9	12,1	10	1,2	2,2	Да
700	10,3	11,8	12,2	13,0	10	0,3	2,3	Да
725	11,2	12,0	12,7	12,3	10	1,0	2,1	Да
750	12,3	11,0	13,2	12,2	10	0,8	2,4	Да
775	12,5	11,8	12,7	12,4	10	1,5	2,0	Да
800	12,8	12,3	12,9	12,1	10	1,7	2,2	Да
850	11,9	11,8	13,1	10,6	10	0,5	2,3	Да
900	11,8	11,2	12,5	11,7	10	0,9	1,9	Да
950	10,9	11,7	12,8	13,2	10	0,7	2,4	Да
1000	11,1	11,6	12,5	11,7	10	0,9	1,9	Да

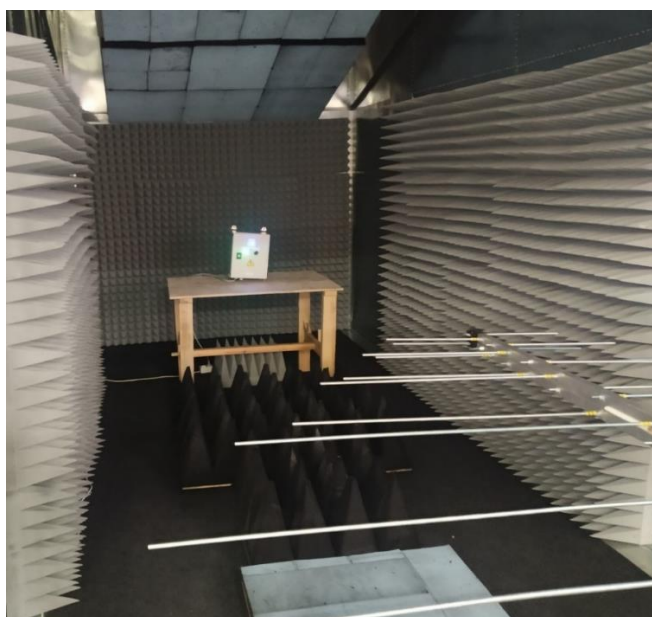


Рисунок 37 – Общий вид расположения тестируемой НКУ по отношению к излучающей антенне в БЭК

Выводы по разделу 3. Проведены экспериментальные исследования низковольтного комплектного устройства в рамках требований технических регламентов ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» и ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».

В части ТС 004/2011 проведены тесты НКУ на:

- герметичность к попаданию воды;
- электрическую прочность изоляции;
- соответствие номинального сечения проводников;
- эффективность непрерывной цепи заземления между открытыми токопроводящими частями НКУ и защитной цепью;
- предельные значения превышения температуры;
- устойчивость к импульсному напряжению.

Подтверждено соответствие НКУ требованиям ГОСТ ИЕС 61439-1, что обеспечивает достаточность выдачи сертификата по ТС 004/2011. В части ТС 020/2011 проведены тесты НКУ на помехоэмиссию и восприимчивость к электромагнитному излучению. При рассмотрении вопросов обеспечения электромагнитной безопасности систем от электромагнитного излучения, от НКУ, обоснован подход «пороговой» ЭМС концепции. С позиции теории радиолокации выбран угловой шаг азимутального позиционирования НКУ равный 60 градусов. Проведена оценка однородности электромагнитного поля в испытательной зоне для тестирования НКУ на восприимчивость и экспериментально доказано соответствие требованию 6 дБ данного параметра. На основании результатов испытаний подтверждено соответствие НКУ требованиям помехоэмиссии и помехоустойчивости, что обеспечивает достаточность выдачи сертификата по ТС 004/2011.

Заключение

В магистерской диссертации обосновано и осуществлено совершенствование экспериментальной базы и методов сертификационных испытаний для оценки безопасности и обеспечение электромагнитной совместимости низковольтных комплектных устройств.

Проанализированы характеристики объекта исследования и на основании этого обосновано совершенствование испытаний, предъявляемых действующими техническими регламентами. Для повышения качества на выходе процесса сертификации сформулированы необходимые требования к лаборатории, в том числе к ее персоналу, а также тестируемым изделиям.

В рамках совершенствования процессов и обеспечения достоверности и надежности результатов тестирования предложены методики внутренней периодической проверки и оценки оборудования. Обоснован подход межкамерных сравнений лабораторий в части проведения испытаний на электромагнитную совместимость. Предложена оптимальная конструкция безэховой камеры и входящей в нее измерительной площадки, обеспечивающей однородность проводящей поверхности. Проведена аттестация испытательной безэховой камеры с учетом усовершенствованного подхода, по результатам которой доказана ее применимость для выполнения сертификационных ЭМС тестов.

Проведены экспериментальные исследования низковольтного комплектного устройства в рамках требований технических регламентов ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» и ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств» в соответствии с предложенными усовершенствованными методами. По результатам испытаний подтверждено соответствие НКУ требованиям качества и безопасности. Была проведена оценка однородности электромагнитного поля в испытательной зоне для тестирования НКУ на восприимчивость и экспериментально доказали, что данный параметр соответствует требованиям.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Аветисян Д.А. Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2015. 511 с.
2. Алексеев А.Г., Штагер Е.А. Козырев С.В. Физические основы технологии stealth. СПб.: ВВМ, 2017. 232 с.
3. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. М.: Высшая школа, 2020. 255 с.
4. Васильев А.А., Крючков И.П., Нияшкова Е.Ф. Электрическая часть станций и подстанций. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 2017. 553 с.
5. ГОСТ ISO/IEC 17067-2015. Оценка соответствия. Основные положения сертификации продукции и руководящие указания по схемам сертификации продукции. М.: Стандартиформ, 2016.
6. ГОСТ Р 51320-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств – источников промышленных радиопомех. М.: Изд-во стандартов, 1999.
7. ГОСТ 30804.4.3-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2013.
8. ГОСТ CISPR 16-1-4-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. М.: Стандартиформ, 2015.
9. ГОСТ 30372-17. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2020.
10. ГОСТ IEC 61439-1-2013. Устройства комплектные низковольтные распределения и управления. Часть 1. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2015.

11. ГОСТ 30805.22-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений. М.: Стандартинформ, 2015.
12. ГОСТ CISPR 14-1-2015. Электромагнитная совместимость. Требования для бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных аппаратов. Часть 1. Электромагнитная эмиссия. – М.: Стандартинформ, 2016.
13. Гринчук Ф.Ф., Хавроничев С.В. Комплектные распределительные устройства напряжением 6÷10 кВ. Часть I: Учеб. пособие / ВоГГТУ: Волгоград, 2016. 88 с.
14. Дамлер А., Грифорин Б. Испытания радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий. М.: Энергия, 2019. 237 с.
15. Докукин А.В. Правовые вопросы разработки и распространения стандартов. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2018. № 4. С.56-59.
16. Дубина И.Н. Электротехнические измерения. М.: КноРус, 2022. 208 с.
17. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 2020. 196 с.
18. Жарков Ю.И., Лысенко В.Г., Стороженко Е.А. Автоматизация диагностирования систем релейной защиты и автоматики электроустановок. М.: Маршрут, 2019. 178 с.
19. ИСО – Международная организация по стандартизации.: [Электронный ресурс]. URL:<http://www.iso.org/iso/home.htm> (Дата обращения: 18.02.2023).
20. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 2017. 336 с.

21. Ковнеристый Ю.К., Лазарев И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучение. М.: Наука, 2020. 165 с.
22. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2013. 671 с.
23. Лифиц, И.М. Стандартизация, метрология, сертификация. М.: Юрайт, 2019. 314 с.
24. Маслов О. Н. Экологический риск и электромагнитная безопасность. М.: ИРИАС, 2017. 330 с.
25. Маслова У.В. Излучаемые электромагнитные помехи от низковольтного комплектного устройства в контексте критерия приемлемого риска потери качества новых автомобилей в эксплуатации. // IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тула. 2023. С. 413-415.
26. Маслова У.В. Выбор шага азимутального позиционирования низковольтного комплектного устройства при испытаниях автомобилей по параметрам качества помехоустойчивости от электромагнитных воздействий. // IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тула. 2023. С. 416-418.
27. Мицмахер М.Ю. Безэховые камеры СВЧ. М.: Радио и связь, 2020. 129 с.
28. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. М.: ЭНАС, 2018. 504 с.
29. Околович М.Н. Проектирование электрических станций. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 2020. 263 с.
30. Ополева Г.Н. Схемы и подстанций электроснабжения. М.: ФорумИнфра-М, 2017. 480 с.
31. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2018. 648 с.

32. Стреха А.А., Докукин А.В., Галкин В.Е. Совершенствование системы информационного обеспечения процессов разработки и применения стандартов // Транспортное дело России. 2014. № 6. С.32-34.
33. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования». Таможенный союз, 2011.
34. Технический регламент Таможенного союза ТР 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств». Таможенный союз, 2011.
35. Федеральный закон от 27.12.2002 №184-ФЗ (ред. от 28.11.2015) «О техническом регулировании». Таможенный союз, 2011.
36. Яковлев В.А. Технологии контроля низковольтных электротехнических изделий. М.: Высшая школа, 2020. 227 с.
37. Armstrong K. Design Techniques for EMC. Pt. 2 Cables and connectors. Compliance Journal. 2016, № 64. P. 23–34.
38. ISO/IEC 17025. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ITD). 2019.
39. IEC 60085:2007. Electrical insulation - Thermal evaluation and designation. 2007.
40. IEC 60068-2-2:2007. Environmental testing - Part 2-2: Tests - Test B: Dry heat. 2007.
41. IEC 60364-4-44:2007. Electrical installations of buildings - Part 4-44: Protection for safety - Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances. 2007.
42. Kobayashi K. RCS Analysis of cannical two-dimensional material-loaded Cavities with rectangular and circular cross sections // In special issue on RCS of complex objects. Ann. des Telecommun. 2015. Vol.5. № 5. P. 517-522.