

Технологии электромагнитной совместимости *Technologies of electromagnetic compatibility* 2020. № 1(72).

emc-journal.ru

ISSN 1729-2670

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9669 от 24 августа 2001 года

Оформить подписку можно

по объединенному каталогу «Пресса России»:

10362 — полугодовой индекс;**в издательстве (предпочтительно) (8-985-134-4367).**

Журнал включен в перечень ведущих журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory». Журнал входит в РИНЦ.

**Главный редактор журнала,
председатель редакционного совета**

КЕЧИЕВ ЛЕОНИД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.

Зам. главного редактора журнала

БАЛЮК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.

БАРМАКОВ ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.

ФАЙЗРАХМАНОВ НИКОЛАЙ ИСХАКОВИЧ

Редакционный совет:

БУТИН ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ, д.т.н., проф.

ВОРШЕВСКИЙ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ, д.т.н., проф.

ГЕРАСИМЧУК ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ, к.т.н.

ДАНИЛЕНКО КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н.

КИРИЛЛОВ ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., проф.

КИШКИН ВЛАДИМИР ЛЬВОВИЧ, д.т.н.

КОСТРОМИНОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ,

д.т.н., проф.

КРИВОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ, д.т.н., проф.

МЫРОВА ЛЮДМИЛА ОШЕРОВНА, д.т.н., проф.

НЕФЕДОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ, д.т.н., проф.

НИКИТИНА ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВНА, д.мед.н., проф.

НИКИФОРОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, к.т.н.

НИКОЛАЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ, д.т.н.

ПОЖИДАЕВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ, д.т.н., проф.

САРЫЛОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, к.т.н.

САХАРОВ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., с.н.с.

СУХОРУКОВ СЕРГЕЙ АРСЕНЬЕВИЧ, к.т.н., доцент.

ТУХАС ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.

ФОМИНИЧ ЭДУАРД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.

ЧЕРМОШЕНЦЕВ СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ, д.т.н., проф.

ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

НОЧУ «Новая Инженерная Школа»

127273, Москва, Березовая аллея, д. 5А, стр. 5.

Редакция: тел. +7-985-134-4367,

e-mail: vera.nesch@gmail.com.

Статьи рецензируются. Статьи опубликованы в авторской редакции. Мнение членов редакционного совета может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Рукописи не возвращаются.

Подписано к печати 17.03.2020

70 лет 12 Центральному научно-исследовательскому
Краснознаменному институту
Министерства обороны
им. В.А. Болятко.



12 ЦНИИ

Technologies of electromagnetic compatibility 2020. № 1(72).

emc-journal.ru

Founder of the magazine:

LLC «Publishing house «Technology».

Registered in the Ministry of the Russian Federation for Press, Broadcasting and Mass Communications. Registration certificate ПИ № 77-9669 of 24 August 2001.

You can subscribe «Press of Russia» on the general catalog: 10362 – a semi-annual index; publishing (preferably) (+7-985-134-4367).

ISSN 1729-2670

The magazine is included in the list of leading journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC).

The journal is included in the Abstract Journal of VINITI data and databases. For information about the journal are published annually in the international reference system for periodicals and series «Ulrich's Periodicals Directory». The magazine is included in Science Index

Editor in Chief,

Chairman of Editorial Board

KECHIEV LEONID NIKOLAEVICH, DS, prof. (Moscow, RF).

Deputy chief editor

BALYUK NIKOLAJ VASIL'EVICH, DS, prof. (Moscow, RF).

BARMAKOV IURII NIKOLAEVICH, DS, prof. (Moscow, RF).

FAJZRACHMANOV NIKOLAJ ISKHAKOVICH (Moscow, RF).

Editorial Board:

BUTIN VALENTIN IVANOVICH, DSc, prof. (Moscow, RF).

VORSHEVSKIY ALEKSANDR ALEKSEEVICH, DSc, prof. (St. Petersburg, RF).

GERASIMCHUK OLEG ANATOL'EVICH, PhD. (Moscow, RF)

DANILENKO KONSTANTIN NIKOLAEVICH, DSc. (Moscow, RF).

KIRILLOV VLADIMIR YUR'EVICH, DSc, prof. (Moscow, RF).

KISHKIN VLADIMIR L'VOVICH, DSc. (Moscow, RF).

KOSTROMINOV ALEKSANDR MIKHAILOVICH, DSc, prof. (St. Petersburg, RF).

KRIVOV ANATOLIY SERGEEVICH, DSc, prof. (Moscow, RF).

MYROVA LYUDMILA OSHEROVNA, DSc, prof. (Moscow, RF).

NEFEDOV VIKTOR IVANOVICH, DSc, prof. (Moscow, RF).

NIKITINA VALENTINA NIKOLAEVNA, DSc, prof. (St. Petersburg, RF).

NIKIFOROV VLADIMIR VASIL'EVICH, Ph.d., (Moscow, RF).

NIKOLAEV PAVEL ALEKSANDROVICH, DSc. (Togliatti, RF).

POZHIDAEV EVGENIJ DMITRIEVICH, DSc, prof. (Moscow, RF).

SARYLOV VLADIMIR NIKOLAEVICH, Ph.d. (Moscow, RF).

SAKHAROV KONSTANTIN YUR'EVICH, DSc, (Moscow, RF).

SUKHORUKOV SERGEJ ARSEN'EVICH, Ph.d., (Kalyga, RF).

TUKHAS VYACHESLAV ANATOL'EVICH, DSc, prof. (Petrozavodsk, RF).

FOMINICH EDUARD NIKOLAEVICH, DSc, prof. (St. Petersburg, RF).

CHERMOSHENTSEV SERGEJ FEDOROVICH, DSc, prof. (Kazan, RF)

Publisher: LLC «Publishing house «Technology».

Editorial Board: «New School of Engineering»

127273, Moscow, Berezovaia alleia, d. 5A, str. 5.

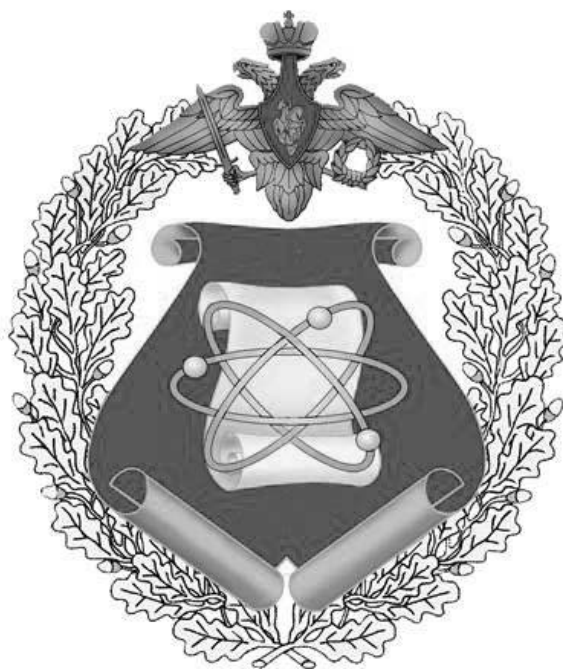
EDITORIAL: +7-985-134-4367,

e-mail: vera.nesch@gmail.com.

The articles are reviewed. Articles published in the original edition. The opinion of the members of the Editorial Board may not reflect the views of the authors of publications. Reprinting of materials is possible only with the written permission of the publisher. Manuscripts will not be returned.

Signed to print 17.03.2020

70 лет 12 Центральному научно-исследовательскому
Краснознаменному институту
Министерства обороны
им. В.А. Боляtko.



12 ЦНИИ

Содержание

Чипко В.М., Перцев С.Ф., Орлов С.Д., Тарасенко С.А., Фисенко И.Д. Формализованная методология при разработке методов исследований технических объектов.....	7
<i>Chipko V.M., Orlov S.D., Pertsev S.F., Tarasenko S.A., Fisenko I.D. The Formalized Methodology by Development of Methods of Research of Technical Objects</i>	
Кечиев Л.Н., Любомудров А.А., Сахаров М.В., Фоминич Э.Н., Мырова Л.О. Проблемы конструирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости.....	18
<i>Kechiev L.N., Lyubomudrov A.A., Sakharov M.V., Fominich E.N., Myrova L.O. Problems of Designing Electronic Equipment Taking into Account Electromagnetic Compatibility</i>	
Балюк Н.В., Перцев С.Ф., Орлов С.Д. Электромагнитные факторы среды и научно-методическое обеспечение испытаний образцов ВВТ.....	31
<i>Balyuk N.V., Pertsev S.F., Orlov S.D. Environmental Electromagnetic Factors and Methodological Support for Testing Samples of Armaments and Military Engineering</i>	
Бармаков Ю.Н., Бутин В.И., Кундышев П.Я., Сысоева Т.Г., Руденко Ю.А., Тузков Д.А. Резонансные явления при взаимодействии высокочастотных электромагнитных полей с аппаратурой в электропроводящих корпусах.....	39
<i>Barmakov Y.N., Butin V.I., Kundyshchev P.Ya., Sysoeva T.G., Rudenko Y.A., Tuzkov D.A. Resonance Phenomena in Interaction of Microwaves with Devices equipped with Conducting Shield</i>	
Балюк Н.В., Давыдов А.А., Крохалев Д.И., Малофеев Д.А., Орлов С.Д. Методология подтверждения соответствия образцов вооружения и военной техники заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности.....	49
<i>Balyuk N.V., Davydov A.A., Krokhaliev D.I., Malofeev D.A., Orlov S.D. The Methodology of Verification of Armaments and Military Engineering to Compliance with the Requirements of Electromagnetic Immunity and Safety</i>	
Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Сухов А.В., Уголев В.Л., Денисов М.Ю. Средства измерений импульсных электромагнитных полей и токов.....	63
<i>Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Sukhov A. V., Ugolev V. L., Denisov M. Yu. Measuring Instruments of Transient Electromagnetic Fields and Currents</i>	
Акиншин И.В., Балюк Н.В., Жихарев В.М., Крохалёв Д.И., Матюкевич С.Н., Пыж А.В., Ушанов Д.Н. Методы и средства испытаний технических средств на помехоустойчивость в условиях воздействия мощных радиочастотных электромагнитных полей.....	77
<i>Akinshin I.V., Balyuk N.V., Jikharev V.M., Krokhaliev D.I., Matyukhevich S.N., Pyzh A.V., Ushanov D.N. Approaches and Facilities for Testing Technical Means for Noise Immunity under Powerful Radio-Frequency Electromagnetic Fields</i>	
Акиншин И.В., Крохалев Д.И., Матюкевич С.Н., Пыж А.В., Сидорюк П.А., Фисенко И.Д. Научно-методическое обеспечение испытаний авиационной техники на действие электромагнитных полей метрового диапазона.....	89
<i>Akinshin I.V., Krokhaliev D.I., Matyukhevich S.N., Pyzh A.V., Sidoryuk P.A., Fisenko I.D. Methodological Support for the Tests of Aeronautic Engineering on the Action of Electromagnetic Fields of VHF Range</i>	
Агапов Е.В., Пашков А.Ю., Заруцкий А.О., Зеленский И.И., Красноперов Д.Б., Оленевский В.В., Плыгач В.А., Самсонов Г.В. Методы и средства воспроизведения воздействия импульсных электромагнитных полей и токов молнии на экспериментальной базе 12 ЦНИИ.	97
<i>Agapov E.V., Zarutskiy A.O., Zelenskiy I.I., Krasnoperov D.B., Olenevskiy V.V., Pashkov A.Yu., Plygach V.A., Samsonov G.V. Methods and Means of Testing Weapons and Military Equipment Samples at the Experimental Test Base 12 Central Research Institute Under the Influence of Pulsed Electromagnetic Fields and Lightning Currents</i>	

- Виноградов К.А., Кормишин В.Г., Крохалев Д.И., Зорин М.В., Шукин Д.Е.** Автоматизация процесса испытаний авиационной техники и вооружения на действие электромагнитных полей радиотехнических средств..... 109
Vinogradov K.A., Kormishin V.G., Krokhalov D.I., Pashkov A.Yu., Schukin D.E. Automatization of Tests of the Aviation Technics on the Action of Electromagnetic Fields of Radio Aids
- Лещук Е.В., Лоборев В.М., Пантелеев С.В., Прокушев Д.С.** Опасность воздействий сверхвысокочастотного излучения солнечных космических электростанций на околоземные объекты..... 117
Leschukh E.B., Loborev V.M., Panteleev S.V., Prokushev D.S. The Danger of Ultra-high-frequency Radiowaves Exposure from the Space-based Solar Power Plants on the Near-earth Objects
- Лебедев Н.В., Назаров С.А., Никольский В.А.** Комплекс численных методик для определения характеристик импульсного электромагнитного поля, проникающего через щелевые неоднородности электромагнитного экрана в среде ионосферной плазмы Земли..... 123
Lebedev N.V., Nazarov S.A., Nikol'skii V.A. Complex of Numerical Procedures for Calculating Characteristics of the Pulsed Electromagnetic Field Penetrating Through Slot-hole Heterogeneities of the Electromagnetic Shield in the Earth Ionospheric Plasma Medium
- Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В.** Физическая модель для оценки параметров низкочастотного излучения в волноводе Земля-ионосфера, генерируемого токами в литосфере Земли..... 133
Kobernik D.A., Nikolskiy V.A., Rudenko V.V. Physical Model for Registration of Low-frequency Electromagnetic Radiation in Earth-ionosphere Waveguide Generated by Currents in the Earth Lithosphere
- Бойко Е.И., Иванов Е.В., Лопотов В.С., Попова В.Н.** Расчетно-экспериментальные исследования по оценке параметров электромагнитного поля сверхкороткоимпульсных излучателей с учетом влияния подстилающей поверхности..... 144
Boyko E.N., Ivanov E.V., Lopotov V.S., Popova V.N. Calculating and Measuring Conductions of Electromagnetic Field Characteristics Value of Ultrashort Pulse Radiators with Underlying Surface Influence
- Гончаров А.Н., Калмыков П.Н., Бойко Е.Н., Родин И.А.** Методика определения параметров наведенных сигналов при воздействии радиочастотного излучения на кабельные линии связи..... 151
Goncharov A.N., Kalmykov P.N., Boyko E.N., Rodin I.A. Method for the Parameters of Induced Signals when Exposed to Radiofrequency Radiation on Cable Communication Lines
- Гончаров А.Н., Калмыков П.Н., Пирожков А.А., Степанов М.С.** Оценка напряжения наведенного сигнала при воздействии радиочастотного излучения на кабельные линии связи радиоэлектронной аппаратуры технических средств..... 161
Goncharov A.N., Kalmykov P.N., Pirozhkov A.A., Stepanov M.S. Assessing the voltage of the induced signal under the influence of radiofrequency radiation on the electric equipment hardware



12ЦНИИ

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРОВ!

25 июня 2020 года исполняется 70 лет 12 Центральному научно-исследовательскому Краснознаменному институту Министерства обороны им. В.А. Болятко.

За годы существования института пройден славный путь от изучения до создания и освоения науки о ядерном оружии, его боевых свойствах, применении и способах защиты от него.

12 ЦНИИ МО РФ, проводит теоретические и экспериментальные исследования в области разработки, испытания, создания, эксплуатации ядерного оружия и оружия направленной энергии, их поражающего действия на вооружение и военную технику, войска и население, военные и гражданские объекты.

Международную значимость имеют проводимые в институте исследования вопросов контроля за испытаниями ядерного оружия зарубежными странами, контроля за ходом выполнения положений договоров и соглашений по сокращению и ограничению ядерных вооружений.

В последние годы значительное внимание уделяется исследованиям по защите информации о ядерном оружейном комплексе, безопасности и антитеррористической устойчивости специальных объектов Минобороны России.

Институт обладает не имеющей аналогов в стране экспериментально-испытательной базой. Ядерно-физические, электрофизические, световые, механические, лазерные, сверхвысокочастотные и другие моделирующие установки и стенды (более 106 комплексов) обеспечивают проведение комплексных исследований и испытаний крупногабаритных объектов вооружения и военной техники на стойкость к поражающим факторам ядерного оружия, а также к воздействию факторов геофизического и техногенного происхождения. Испытания могут производиться на стационарных установках, а также в местах дислокации объектов с использованием мобильных комплексов-имитаторов.

Экспериментальная база института в части воспроизведения мощных электромагнитных полей, токов и напряжений является крупнейшей в России. В ее развитие существенный вклад внесли: Булатов А.Х., Савашкевич Б.С., Сикарев В.А., Замышляев Б.В., Балюк Н.В.

Работы в 12 ЦНИИ по совершенствованию экспериментальной базы электромагнитных полей ведутся по следующим основным направлениям: модернизация имитаторов, развитие научно-методического обеспечения испытаний, корректировка нормативной базы. В настоящее время отмечается высокая потребность в проведении испытаний образцов ВВТ на соответствие требованиям стойкости и безопасности. За последние 3 года в научно-испытательном центре института проведено более 300 испытаний образцов ВВТ и около двух сотен исследовательских испытаний в обеспечение КНИР. Испытаны стратегические объекты, оперативно-тактические комплексы, комплексы ПВО, образцы бронетанковой техники и ракетно-бомбового вооружения.

12 ЦНИИ МО РФ является головной научно-исследовательской организацией Минобороны Российской Федерации по обоснованию технической политики страны в области сохранения и развития функциональных возможностей ядерного арсенала в современной военно-политической обстановке, а также в области совершенствования специального оружия, мер и способов защиты от него.

Актуальность и высокий научный уровень исследований и испытаний подтверждается успешной реализацией их результатов в Минобороны России, в оборонных и гражданских отраслях промышленности. Заслуги и научный авторитет института в укреплении обороноспособности страны признаны на всех уровнях государственного и военного руководства, в научном сообществе Российской Федерации.

За выдающийся вклад в укрепление обороноспособности страны Указом Президиума Верховного Совета СССР от 2 февраля 1968 года институт награжден орденом Красного Знамени с вручением Боевого Красного Знамени.

За годы существования института подготовлено 105 докторов и 736 кандидатов наук, 43 профессора, 462 старших научных сотрудников и 25 доцентов по специальности.

За большой личный вклад в развитие науки 2 сотрудника стали лауреатами Ленинской премии, 14 – лауреатами Государственной премии СССР, 5 – лауреатами премии Совета Министров СССР, 27 – лауреатами премии Правительства Российской Федерации.

В настоящее время институт располагает высоким научным потенциалом. В его рядах трудятся 22 профессора, 51 доктор и 207 кандидатов наук, 23 доцента, 25 лауреатов премии Правительства РФ, 9 заслуженных деятелей науки и техники, 5 заслуженных изобретателей РФ. Научно-исследовательские работы проводятся более чем с 260 научно-исследовательскими, опытно-конструкторскими, проектными организациями и ВУЗами Российской Федерации.

Редакция журнала Технологии ЭМС поздравляет с юбилеем ветеранов и коллектив сотрудников 12 ЦНИИ МО РФ, желает здоровья, благополучия и успехов в научных исследованиях и укреплении обороноспособности Родины.

УДК 359.623

В.М. Чипко, С.Д. Орлов, С.Ф. Перцев, С.А. Тарасенко, И.Д. Фисенко

Формализованная методология при разработке методов исследований технических объектов

В статье рассматривается формализованная методология исследования при обосновании требований на разработку вооружения и проведении испытаний в аспекте применения принципов методического моделирования и формализации. Принцип методического моделирования позволяет провести декомпозицию процесса исследования на чётко различающиеся методические этапы, в рамках которых разрабатываются относительно обособленные модели объекта исследования – методические модели. Принцип формализации применяется к методическим моделям, он обеспечивает математическое описание данных моделей, правил их построения, что позволяет оперировать с ними как с математическими образованиями. В статье приводится краткое описание методических моделей, их взаимосвязей, формальное представление – через процесс исследования.

Ключевые слова: формализованная методология, методы исследований, методические модели

В порядке развития методического обеспечения исследований на первой стадии жизненного цикла образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) [1] – «Исследование и обоснование разработки» предложена формализованная методология (ФМ) [2, 3]. Данная методология обозначает вектор развития методологического знания в направлении общей тенденции математизации познаваемых объектов [4, 5].

Из известных классических определений понятия «методология исследования», например, [6, 7], за основу принят вариант его содержания – учение о методах исследования, которое для ФМ конкретизировано императивом «учение, позволяющее разрабатывать методы исследования».

ФМ рассматривается как составная часть некоторой прикладной теории. На рис. 1 показано принятое представление о структуре прикладной теории, её основных и производных элементах, роли методологии, связях со смежными областями научного знания. Роль методологии определяется тем, что она способствует развитию прикладной теории, поскольку порождает новые методы исследования.

Структура ФМ соответствует общепринятому порядку прикладного научного исследования, она представлена на рис. 2. Отдельные этапы исследования поддерживаются формализованными математическими образованиями, также обозначенными на рис. 2.

ФМ построена на основополагающих принципах: системности, адекватности, методического моделирования, формализации. Принцип методического моделирования представляет процесс исследования как последовательную, по этапам метода (исследования), смену моделей объекта исследования – методических моделей (ММ).

Каждая ММ имеет физическую модель и своё математическое описание. Объект исследования в ММ развивается в процессе познания от вербального представления до формального, от требуемых свойств, через элементы объекта, связи, величины, частные задачи, методы решения частных задач и общие задачи до числовых значений величин, определяющих требуемый облик объекта исследования.

Под методической моделью понимается модель, отражающая виртуальное представление об образе объекта в связях его составляющих элементов, познанных на некотором этапе разработки метода исследования [3]. В обобщённом виде ММ представлены в табл. 1.

Примером практического приложения указанных методических разработок являются работы [8, 9], посвященные исследованию принципов синтеза формальной структуры системы управления рисками функциональной безопасности на основе гарантированного результата.

Результатом исследования являются не только численные значения искомого вектора параметров, но и методические разработки, в частности система методических моделей, соответствующая

этапам метода исследования. Данная система образует комплексную методическую модель объекта исследования.

Блок-схема комплексной ММ объекта исследования представлена на рис. 3.

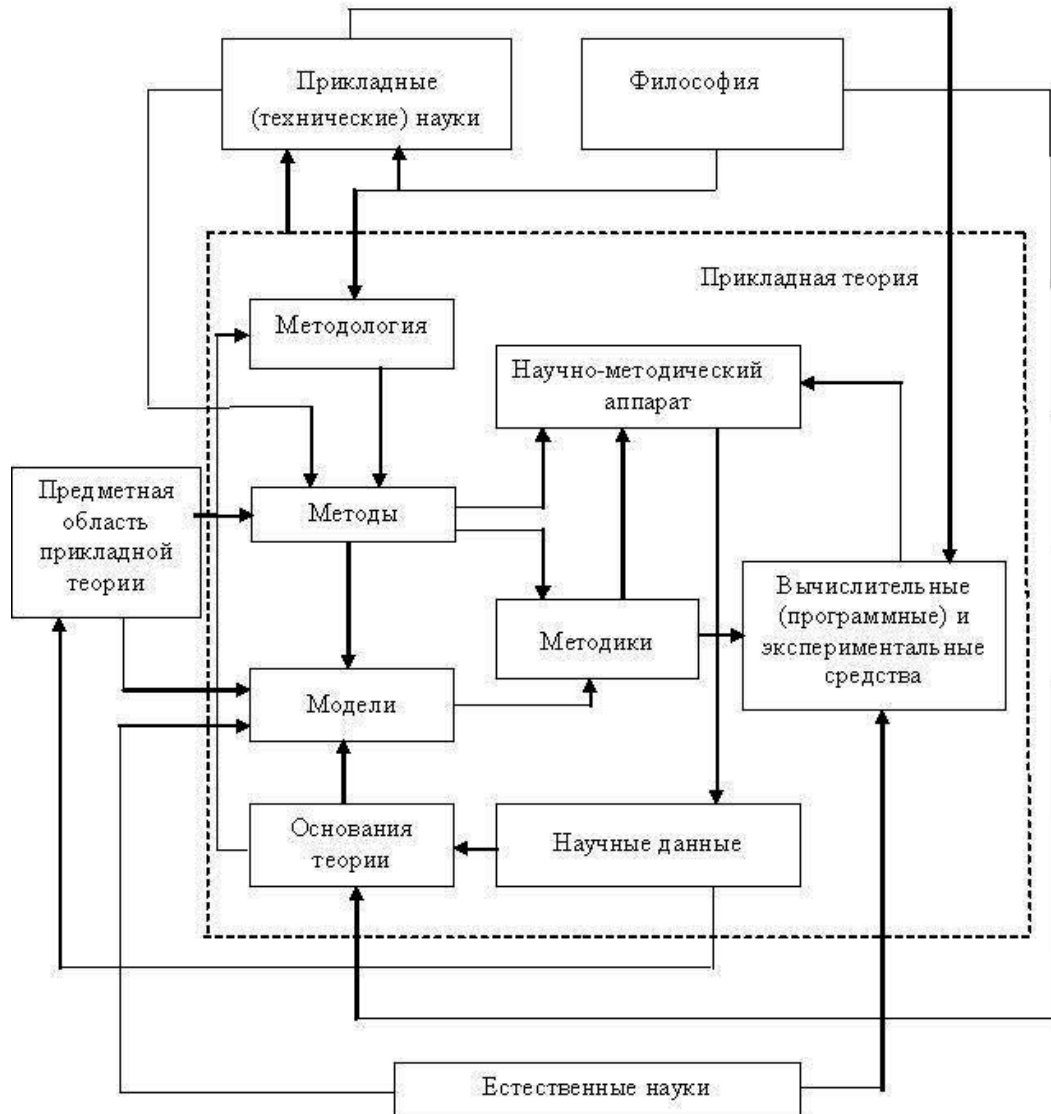


Рис. 1. Структура прикладной теории и ее основные связи в комплексе смежных научных знаний

Как следует из табл. 1 и рис. 3, первой ММ является «Описательная постановка исследования» (ОПИ). ОПИ производится исходя из результатов цели создания объекта и его требуемых свойств, состояния практической сферы деятельности и состояния теоретической основы исследования (основной теории, в рамках которой оно производится). Работы, выполняемые в рамках ОПИ, могут иметь эвристическое содержание.

Как ММ, описательная постановка исследования представляется вектором:

$$M_{ОПЗ} = (C_{ОПЗ}, l_p, l_1^*, {}^xS_{ОПЗ}, {}^xO_{ОПЗ}, {}^xW_{ОПЗ}^y, {}^xW_{ОПЗ}^{ny}, {}^xW_{ОПЗ}^k, {}^xP_{ОПЗ}),$$

где $C_{ОПЗ}$ – множество целей исследования – используется для формирования полной группы (всей требуемой совокупности) существенных свойств в ММ свойств, а также используется для назначения принципов принятия решений по переменным и критериям в ММ формальной постановки задачи; l_1^* – объект исследования; l_p – прототип объекта исследования; ${}^xS_{ОПЗ}$ – неполное и неупорядоченное множество требуемых свойств объекта – используется совместно с множеством целей $C_{ОПЗ}$ для

построения ММ свойств, содержащей полный, упорядоченный методом классификации перечень требуемых свойств объекта исследования; ${}^*O_{ОПЗ}$ – неполное и неупорядоченное множество объектов надсистемы, объектов, по отношению к которым проявляются требуемые свойства образца, а также его составных частей – используется при построении ММ связей, в которой данные и другие объекты систематизированы и связаны системой исследования; ${}^*W_{ОПЗ}^y$ (${}^*W_{ОПЗ}^{xy}$) – неполное множество принципов принятия решений по управляемым (неуправляемым) переменным; ${}^*W_{ОПЗ}^k$ – неполное множество принципов принятия решений по критериям (предполагаемый метод решения многокритериальной задачи); ${}^*P_{ОПЗ}$ – числовые значения отдельных показателей достижения целей исследования (критериев) и ограничений – используются в формальной постановке задачи.

Из комплексной ММ следует, что данные, сосредоточенные в ОПИ, используются для разработки ММ свойств объекта исследования. ММ свойств формализуется графом свойств. Граф свойств – это направленный граф, в котором направления дуг задаются порядком классификации: от вершин, соответствующих существенным свойствам к вершинам соответствующим элементарным свойствам. Поэтому вершины в данном графе имеют только иерархические связи, образующиеся в процессе классификации, т.е. классификационные связи.

Граф свойств задается в виде вектора:

$$G_c(S_c, D_c),$$

где S_c – множество вершин, соответствующих требуемым свойствам объекта; D_c – множество ребер, связывающих эти вершины.

В ФМ методическая модель требуемых свойств, в классическом представлении, интерпретируется как «первичная идеализированная модель объекта». Не смотря на применение для её разработки диалектического метода классификации, данная модель также в основном имеет эвристическое содержание.

Далее на этапе разработки системы исследования (табл. 1) формируется ММ связей объекта исследования, которая включает изучаемые закономерности, связывающие элементы системы исследования (СИ). Под СИ понимается абстрактная целенаправленная система, включающая связанные между собой создаваемый образец, объекты проявления его свойств, объекты надсистемы, а также их составные части. То есть ММ связей содержит все элементы СИ и задается одновременно с заданием СИ вектором:

$$G_{СИ} = ((S_i); (j_s); (L_i^j); F; R; L_{c.c}),$$

где (S_i) – вектор существенных свойств объекта исследования или страт системы исследования; (j_s) – вектор уровней сложности системы по стратам; L_i^j – множество элементов на j -ом уровне i -ой страты; F – множество отношений типа «иерархическая подчиненность»; R – множество отношений типа «проявление свойства»; $L_{c.c}$ – множество элементов среды системы.

Для задания ММ связей используются введенные в [2] операции над системными объектами:

- стратификации (макросистемы исследования) в соответствии с требуемыми существенными свойствами объекта;
- деления элементов страт по уровням сложности методом классификации в соответствии с ММ требуемых свойств;
- эшелонирования элементов, состоящая в формировании множества пар элементов, связанных между собой отношением «проявление требуемого свойства» (из модели свойств).

Далее, в соответствии с комплексной ММ, разрабатывается ММ величин объекта. Эта модель описывается параметрическим графом, в котором величины: параметры, показатели, критерии – объединены по образу изучаемых закономерностей из ММ связей объекта. При этом начальные вершины графа соответствуют независимым (оптимизируемым) переменным, характеризующим элементарные свойства из ММ свойств, а конечные вершины – критериям, оценивающим требуемые существенные свойства объекта исследования.

ММ величин описывается связным графом:

$$G^{III}(V^{III}, E^{III}),$$

где V^{III} – множество вершин параметрического графа; E^{III} – множество ребер параметрического графа.

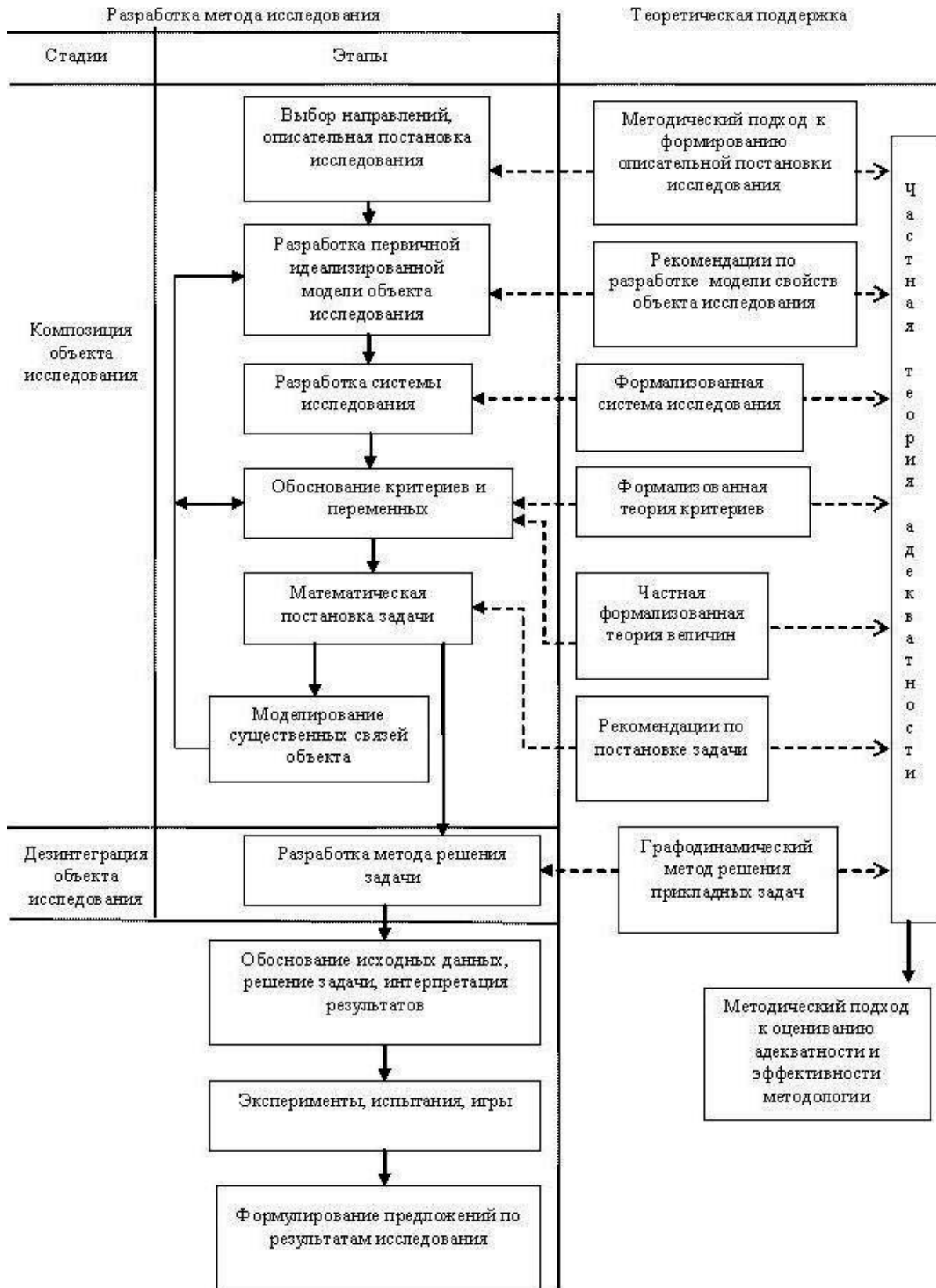


Рис. 2. Структурная схема формализованной методологии

Таблица 1

Методические модели объекта исследования, используемые в формализованной методологии

№	Этап разработки метода исследования	Методическая модель объекта	
		Наименование	Содержание
1	Выбор направлений исследования	Вербальная (описательная) постановка исследования	Цели создания и исследования объекта, описательная модель объекта
2	Разработка первичной «идеализированной» модели объекта	Модель свойств объекта	Комплекс иерархически связанных требуемых свойств объекта
3	Разработка системы исследования	Система исследования (модель связей) объекта	Совокупность логических внутренних и внешних изучаемых связей объекта, отражающих проявления его требуемых свойств
4	Обоснование критериев и переменных	Полная информационная модель – модель величин объекта	Совокупность, связанных логикой существенных связей элементов системы исследования величин, характеризующих и оценивающих требуемые свойства объекта
5	Математическая постановка задачи	Формальная математическая постановка общей расчетной задачи	Система абстрактных уравнений общей расчетной задачи с принципами принятия решений (решающими правилами) по величинам, характеризующим и оценивающим требуемые свойства объекта
6	Моделирование (математическое описание) существенных связей объекта	Математическая модель объекта исследования	Комплекс математических моделей связей элементов системы исследования
7	Декомпозиция общей расчетной задачи	Система частных задач	Совокупность связанных между собой расчетных частных задач
8	Постановка и разработка методов решения частных задач	Постановка и методы решения частных задач	Типовой математический (канонический) вид i -ой частной задачи, позволяющий применять стандартные математические методы
9	Определение информационного взаимодействия частных задач	Система методов решения частных задач	Комплекс методов и связи решений частных задач
10	Моделирование решения общей задачи	Синтез общей задачи	Порядок и объем решения частных задач
11	Обобщение решения общей задачи	Результат решения общей задачи	Множество величин, составляющих результат исследования

Исходя из ММ величин в соответствии с комплексной методической моделью разрабатываются ММ «Формальная математическая постановка общей расчетной задачи». Данная ММ имеет традиционное содержание и задается в виде вектора $M_{\text{ФПОЗ}}$:

$$M_{\text{ФПОЗ}} = (X, Y, Z, \{k_j(X, Y, Z)\}, \{extr(X)\}, \{rule(Y, Z)\}, rule(K), \Omega),$$

где Ω – области существования переменных и функций; $extr$ – принципы принятия решения по управляемым переменным (X); $rule$ – принципы принятия решения по неуправляемым переменным (Y, Z) и по критериям ($k_j \in K$) в методе решения общей задачи при её многокритериальной постановке.

Принципы принятия решения по управляемым переменным вытекают из закономерностей, изучаемых в теории вооружения [10]. Принципы принятия решения по неуправляемым переменным

разработаны в теории принятия решений в условиях неопределённости, например, [11]. Методы решения многокритериальных задач также достаточно разработаны, например, в [12].

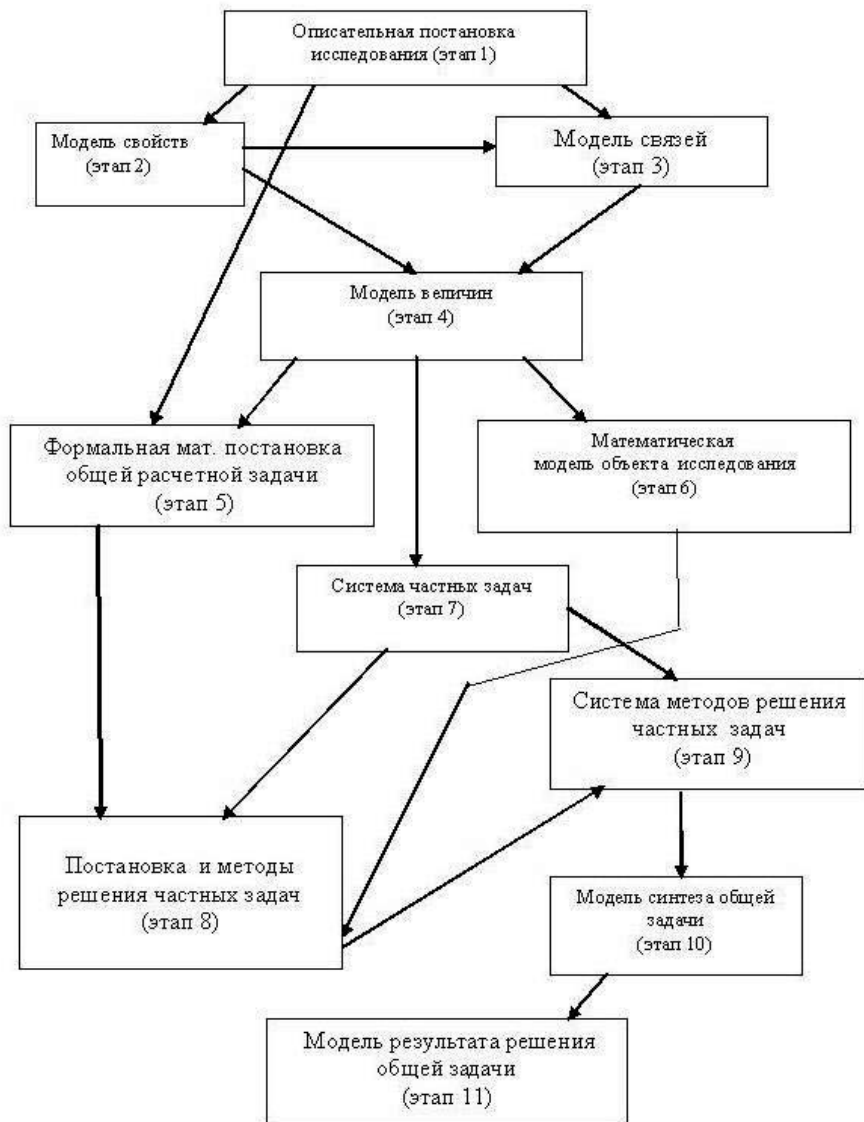


Рис. 3. Комплексная методическая модель объекта исследования

ММ «Система частных задач» образуется из ММ величин без потери информации и содержит высокую долю формальной составляющей. Данная ММ описывается графом частных задач (ГЧЗ), который образуется из параметрического графа путём применения операций (из теории графов): разрезания рёбер, стягивания образовавшихся подграфов каждого к одной вершине, склеивания рёбер. ГЧЗ описывается выражением:

$$G^3(V^3, E^3),$$

где V^3 – множество вершин, соответствующих частным задачам; E^3 – множество рёбер, соединяющих частные задачи.

Далее разрабатывается ММ «Постановка и методы решения частных задач». Данная ММ задаётся множеством частных задач V^m в объёме их постановок и методов решения. Она также обладает высокой долей формальной составляющей, относящейся к исследуемым в частных задачах закономерностям, принципам принятия решений (по переменным), соответствующим таковым в общей задаче, методам решения частных задач (которые должны быть классическими математическими методами).

В соответствии с табл. 1, следующей ММ, сопровождающей процесс исследования, является «Система методов решения частных задач».

Примером решения частных задач является модель объекта исследований при проведении испытаний изделия на действие электромагнитных полей (ЭМП) радиотехнических средств (РТС).

Решению этой практической задачи предшествует проведение теоретических исследований по обоснованию, выбору и совершенствованию методов и средств испытаний.

В основе формализованной методологии лежит системный подход к объекту исследований, при котором определяется его сущность. То есть определяется совокупность существенных свойств объекта исследования, объекты, по отношению к которым эти свойства проявляются, а также связи и закономерности, реализующие данные свойства. Для реализации системного подхода необходимо разработать функциональную систему, включающую совокупность воздействующих факторов, методов и средств испытаний и самого изделия, взаимодействующих по неявным связям. Из основных принципов декомпозиции наиболее подходящими являются, стратификация и эшелонирование. Стратификация предполагает задание системы в виде нескольких моделей, описывающих систему с различных точек зрения. Эшелонирование, подразумевает представление системы в виде взаимодействующих подсистем, часть из которых может находиться под управлением других.

Систему исследования модели испытаний можно представить в виде трех страт (объект испытания, воздействующие электромагнитные факторы, методы и средства испытаний), разбиение системы на элементы одного уровня каждой страты представлены на рис. 4–6.

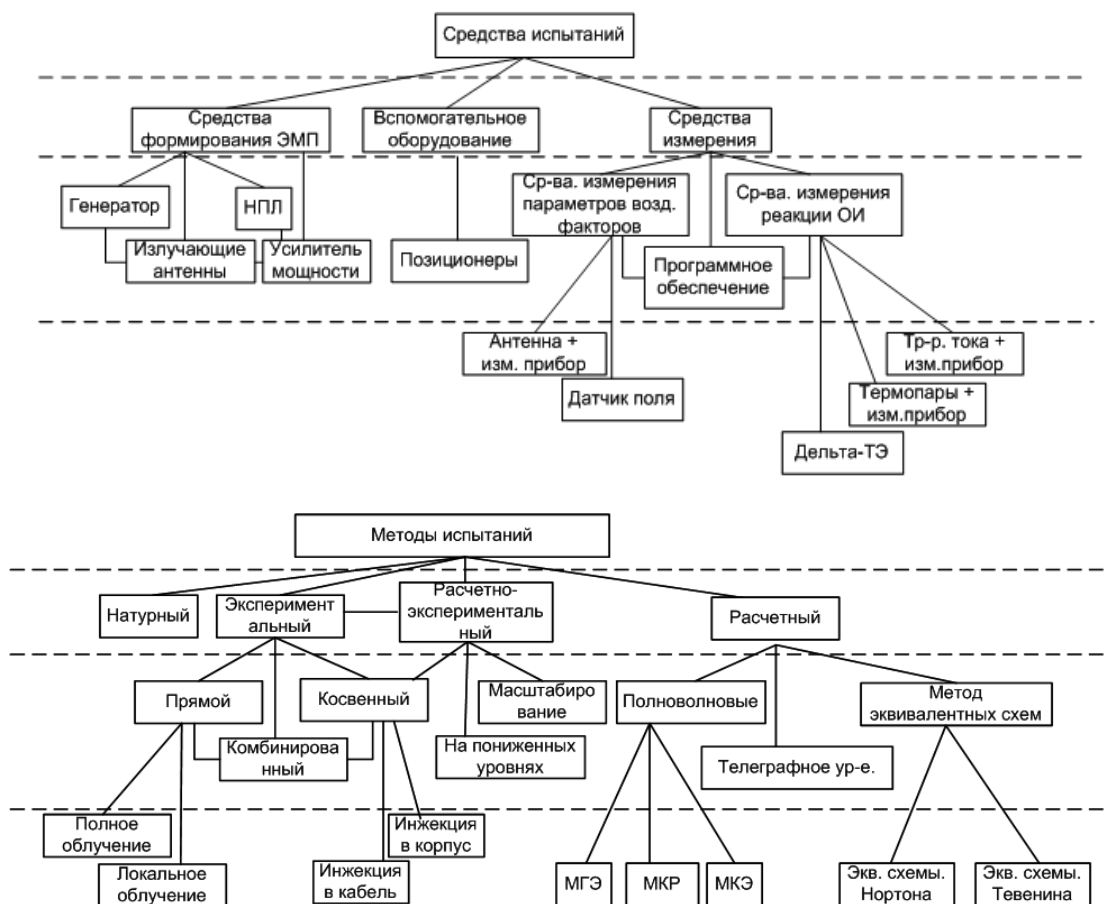


Рис. 4. Страта «Методы и средства испытаний» (МГЭ – метод граничных элементов; МКР – метод конечных разностей; МКЭ – метод конечных элементов; НПЛ – несимметричная полосковая линия)

На рис. 4 представлена страта «Методы и средства испытаний»; она является системообразующей, поскольку содержит исследуемый объект. На основном уровне находятся методы испытаний и средства испытаний, на последующих уровнях размещаются элементы в соответствии с иерархиями по «Функционально-конструктивному» признаку и свойству «Применимости». Все элементы клас-

сифицированы по уровням, содержащим объекты, на которых непосредственно проявляются существенные свойства исследуемого объекта.

Рассмотрим элемент «Средства испытаний». Он включает в себя на более низких уровнях средства измерения, средства формирования ЭМП и вспомогательное оборудование, подробный состав и описание которых приведены выше. Иерархия «Методы испытаний» построена на свойстве «Применимость» и включает в себя существующие методы и их свойства, применимые при испытаниях на безопасность использования в условиях действия ЭМП.

Стоит отметить, что в страте представлены все классы методов, учитываются возможности ЭИБ для обеспечения испытаний и возможности применения экспериментального и расчетно-экспериментального методов. При построении системы исследования включение элементов, не оказывающих существенного влияния на объекты исследования, нецелесообразно.

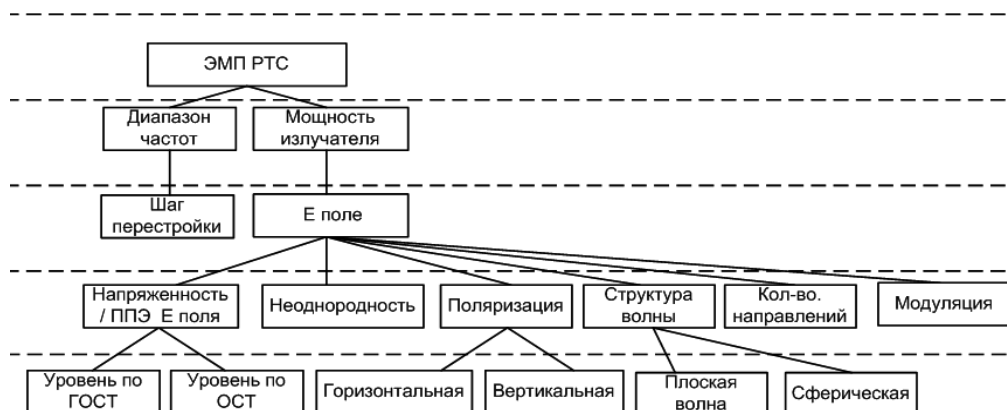


Рис. 5. Страта «ЭМП РТС» (ППЭ – плотность потока энергии)

На рис. 5 изображена структурная схема, характеризующая внешний воздействующий фактор (ЭМП РТС), в ней представлены параметры и характеристики, задаваемые в качестве требований нормативных документов (НД) при проведении испытаний образцов ВВСТ на действие ЭМП РТС.

Воздействующий фактор может быть представлен при построении системы исследования в виде отдельной страты, поскольку очевидно имеет четкую иерархию между элементами, распределенными по уровням. Однако при проведении испытаний воздействующий фактор представляется в качестве «продукта», производимого средствами испытаний в строгом соответствии с требованиями НД. При построении системы исследования характеристики воздействующего ЭМП будут представляться в качестве параметров, характеризующих средства испытания.

Графическая форма системы исследования модели испытаний в окончательном виде представлена на рис. 6. Как показано на нем, система исследований представлена в виде двух страт «Изделие» и «Методы и средства испытаний».

Страта «Изделие» представлена в обобщенном виде и включает в себя основные элементы, характеризующие восприимчивость объекта испытания действию ЭМП. Исходя из иерархии, на низшем уровне расположен элемент «ЭВУ»; такая классификация характерна для всех классов объектов испытания.

Страта «Методы и средства испытаний» включает средства испытаний характерные прямому методу, предусматривающие полное и локальное облучение, и расчетно-экспериментальному методу, для реализации которого необходимы соответствующие средства измерений параметров реакции объекта испытаний и параметров воздействующих факторов.

Между элементами страт проявляются существенные свойства, обозначенные эшелонами и характеризующиеся постоянными и переменными параметрами. Следующим этапом исследований является создание методической модели синтеза общей задачи и модели решения общей задачи [3].

Таким образом, методические модели формализованной методологии, являются связанными, относительно замкнутыми математическими структурами, для описания которых применяются теория множеств и теория графов, что обеспечивает новый уровень технологичности прикладного исследования. В динамике трансформации содержания методических моделей, по мере развития иссле-

дования в рамках формализованной методологии, как частный случай реализуется общая закономерность развития знания: от вербального к формальному.

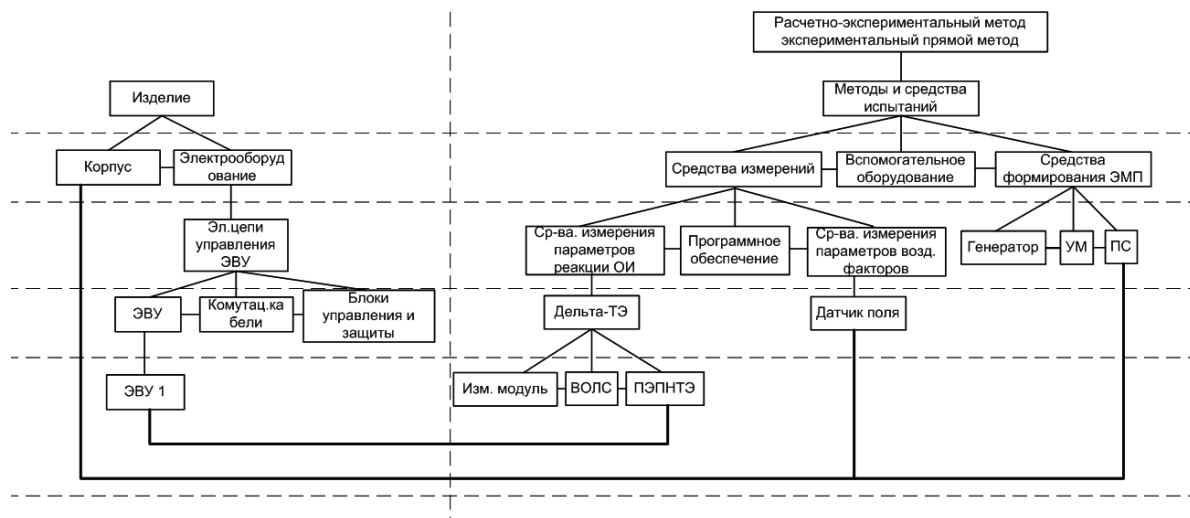


Рис. 6. Система исследований (ЭВУ – электровзрывное устройство; ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи; ОИ – объект испытаний; ПЭПНТЭ – пьезоэлектрический преобразователь наведенных токов (энергий); УМ – усилитель мощности; ПС – полеобразующая система)

Список литературы

1. ГОСТ Р 56135-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. – М.: Росстандарт, 2014.
2. Тарасенко С.А. Основы разработки и организация испытаний специального вооружения и военной техники ВМФ. Теоретические основы обоснования и организация создания: Учебник / Под ред. В.Т. Чемодурова. – С.-Пб.: ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 2002. – 391 с.
3. Тарасенко С.А. Формализованная методология исследования специальной техники. – М.: Красная Звезда, 2017. – 367 с.
4. Методология в сфере теории и практики / Под ред. А.Л. Симакова, В.Н. Карповича. – Новосибирск, Сибирское отделение Академии наук СССР, Наука, 1988. – 306 с.
5. Карпович В.Н., Бондаренко Т.М. Диалектика содержания и формы в процессе математизации науки / Под ред. О.С. Разумовского. – Новосибирск: Сибирское отделение Академии наук СССР, Наука, 1990. – 175 с.
6. Большая Советская Энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1973.
7. Кохановский В.П. и др. Основы философии науки / Под ред. В.П. Кохановского. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 604 с.
8. Михеев В.А., Семин В.Г. Оптимизация процесса управления рисками информационной и функциональной безопасности многофункциональных систем при электромагнитных воздействиях. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – №4 (47). – С. 60–64.
9. Михеев В.А., Семин В.Г. Разработка формальной структуры системы управления рисками информационной и функциональной безопасности многофункциональных систем при электромагнитных воздействиях. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – №4 (47). – С. 65–68.
10. Методы теории развития вооружения ВМФ. – М.: ВИМО, 1987.
11. Трухаев Р.И. Методы исследования процессов принятия решений в условиях неопределенности. – Ленинград: ВМОЛУА, 1972. – 437 с.
12. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Авторы

Чипко Владимир Михайлович, доктор технических наук, начальник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Перцев Сергей Федорович, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Орлов Сергей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России по научно-испытательной работе; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Тарасенко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского центра безопасности технических систем ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская федерация, г. Санкт-Петербург, 197375, ул. Новосельковская, 39; тел. рабочий 8(812)303-05-59, тел. домашний 8(911)703-80-62, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru.

Фисенко Иван Дмитриевич, начальник лаборатории ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Chipko V.M., Orlov S.D., Pertsev S.F., Tarasenko S.A., Fisenko I.D.

The Formalized Methodology by Development of Methods of Research of Technical Objects

Abstract. In the paper, the formalized methodology of research by a validation of requirements for armament development and testing is considered, in aspect of application of principles of methodical modelling and formalization. The principle of methodical modelling allows carrying out decomposition of research process onto clear differing methodical stages, within the limits of which relatively isolated models of object under study – methodical models – are developed. The principle of formalization is applied to methodical models; this principle provides the mathematical description of the given models and rules of their construction that allows to operate with them as with mathematical formations. In the paper, the brief description of methodical models and their interrelations are presented, as well as their formal representation throughout the process of research.

Key words: the formalized methodology, methods of researches, methodical models

References

1. State Standard 56135-2014. Management for life cycle of military production. Generalities. Moscow, Rosstandart Publ., 2014. (In Russian)
2. Tarasenko S.A. *Osnovy razrabotki i organizaciya ispytaniy special'nogo vooruzeniya i voennoy tekhniki VMF. Teoreticheskie osnovy obosnovaniya i organizaciya sozdaniya: Uchebnik* [Fundamentals of development and the organization of tests of special arms and military hardware of Navy. Theoretical bases of a validation, and the organization of creation. Textbook]. St. Petersburg, Publ. of VMA named in honour of N.G. Kuznecov, 2002. 391 p. (In Russian)
3. Tarasenko S.A. *Formalizovannaya metodologiya issledovaniya special'noy tekhniki* [The formalized methodology of research of special engineering]. Moscow, Krasnaya Zvezda Publ., 2017. 367 p. (In Russian)
4. *Metodologiya v sfere teorii i praktiki* [The methodology in the sphere of theory and practice]. Edited by Simakov A.L., Karpovich V.N. Novosibirsk, Siberian department of Academy of Sciences of USSR, Nauka Publ., 1988. 306 p. (In Russian)
5. Karpovich V.N., Bondarenko T.M. *Dialektika sodержaniya i formy v processe matematizacii nauki* [Dialectics of substance and form in the process of mathematization of science]. Edited by Razumov-

- sky O.S. Novosibirsk, Siberian department of Academy of Sciences of USSR, Nauka Publ., 1990. 175 p. (In Russian)
6. *Bol'shaya Sovetskaya Enciklopediya* [Big Soviet Encyclopaedia]. Moscow, Sovetskaya Enciklopediya Publ., 1973. (In Russian)
 7. Kokhanovsky V.P. et al. *Osnovy filisofii nauki* [The foundation of the philosophy of science]. Edited by Kokhanovsky V.P. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2007. 604 p. (In Russian)
 8. Mikheev V.A., Semin V.G. Optimization of process of control risks of information and functional safety of multipurpose systems under electromagnetic exposures. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2013, no. 4 (47), pp. 60–64. (in Russian)
 9. Mikheev V.A., Semin V.G. Development of formal structure of the system of control risks of information and functional safety of multipurpose systems under electromagnetic exposures. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2013, no. 4 (47), pp. 65–68. (in Russian)
 10. *Metody teorii razvitiya vooruzheniya VMF* [Methods of the theory of development of arms of the Navy]. Moscow, VIMO Publ., 1987. (in Russian)
 11. Trukhaev R.I. *Metody issledovaniya processov prinyatiya reshrniy v usloviyakh neopredelennosti* [Methods of research of decision-making processes in conditions of uncertainty]. Leningrad, VMOLUA Publ., 1972. 437 p. (in Russian)
 12. Brakhman T.R. *Mnogokriterial'nost' i vybor al'ternativ v tekhnike* [Principle of multiple criteria and choice of alternatives in technics]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 288 p. (in Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Authors

Chipko Vladimir M., doctor of engineering science, chief of Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Pertsev Sergey F., Honoured Scientist of RF, doctor of engineering science, professor, chief scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Orlov Sergey D., candidate of engineering science, associate professor, assistant chief of the institute in scientific-test activity, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Tarasenko Sergey D., doctor of engineering science, professor, chief scientific associate, Research-and-development center on technical system safety of Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Novosel'kovskaya, 39, 197375 St. Petersburg; office phone 8(812)303-05-59, home phone 8(911)703-80-62, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru.

Fisenko Ivan D., chief of the laboratory, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

УДК 621.396

Л.Н. Кечиев, А.А Любомудров, М.В. Сахаров, Э.Н Фоминич, Л.О. Мырова

Проблемы конструирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости

Рассматриваются вопросы конструирования электронной аппаратуры на современном этапе развития электронных средств. Выделяются наиболее актуальные задачи конструирования: обеспечение целостности сигнала, обеспечение целостности питания, электромагнитная совместимость. Решение этих задач требует от разработчиков и конструкторов более глубокого понимания электрофизических процессов, происходящих при распространении информационного сигнала по линиям передачи и подачи питания по шине питания. Выявлены основные направления, требующие решения при конструировании аппаратуры. Отмечается необходимость совершенствования системы подготовки и переподготовки соответствующих специалистов, а также создания службы внутрисистемной электромагнитной совместимости на предприятиях, занимающихся разработкой технических средств.

Ключевые слова: электронная аппаратура, конструирование, электромагнитная совместимость, целостность сигнала, целостность питания, образование, повышение квалификации

Существо проблемы

Перспективная электронная аппаратура (ЭА) развивается по пути повышения быстродействия, снижения напряжений питания и все большей миниатюризации на уровне элементной базы и печатных узлов. Появляются интегральные микросхемы (ИМС) все большей степени интеграции и функциональной сложности, новые типы многослойных печатных плат (МПП), включая платы высокой плотности, усложняется монтаж высокотехнологичной аппаратуры. В настоящее время сформировались три основные проблемы [1–5], на решение которых должно быть направлено внимание разработчиков и инженеров-конструкторов ЭА: обеспечение целостности сигнала [1, 2], обеспечение целостности питания [6] и ЭМС [7–9]. Проблема целостности сигнала (ЦС) предполагает решение комплекса задач, связанных с качеством сигналов в системе, искажение которых из-за помех и некорректного конструирования может превышать допустимый уровень. Проблема целостности питания (ЦП) охватывает вопросы конструирования системы распределения питания, которая должна отвечать жестким требованиям к целевому полному сопротивлению. Это сопротивление для современных систем находится на уровне долей ома, что ставит перед конструктором сложные задачи. Важнейший комплекс вопросов связан с обеспечением ЭМС. В решение этой проблемы в равной степени участвуют разработчики и конструкторы, которые совместными усилиями добиваются выполнения технического задания по функционированию аппаратуры и прохождения испытаний на соответствии требований ЭМС на заключительном этапе ее создания [5, 10]. Решение перечисленных проблем на стадии конструирования ЭА возможно только опираясь на фундаментальные физические положения и законы, позволяющие получить обоснованные рекомендации, которые в дальнейшем воплощаются в конкретные конструкторские решения [11, 12, 13, 14].

Традиционно конструирование аппаратуры все еще ведется только исходя из массогабаритных требований, требований надежности, обеспечения тепловых режимов и стойкости при механических воздействиях. Эти традиционные вопросы учитывались и при конструировании низкочастотной аппаратуры (НЧ), но они не помогают решить отмеченные выше задачи создания перспективной быстродействующей ЭА. Даже наилучшим образом сконструированная аппаратура может не пройти испытания на ЭМС, если при ее разработке не были учтены специальные вопросы, связанные с ЦС, ЦП и ЭМС.

Если рассмотреть процесс конструирования с позиций электрофизики, то задача конструктора будет сводиться к формированию путей передачи энергии сигнала и питания, а также снижения уровня излучения (помехоэмиссии) от аппаратуры и повышение ее помехозащищенности. Эти факторы будут определяться электрофизическими параметрами каналов передачи полезных сигналов и мощности питания, формированием паразитных путей протекания токов синфазных помех, локализаций излучаемых помех по полю и проводным (кондуктивным) путям, а также снижением восприимчивости к излучаемым и кондуктивным помехам. Только глубокое понимание физических основ электричества и магнетизма, а также электродинамических вопросов, позволяет обосновано принять наиболее рациональные конструкторские решения. Кроме этого, применение цифровой микросхемотехники со стандартными уровнями сигналов практически свело на нет необходимость расчета электрических цепей. Все это требует пересмотра философии проектирования, перенесены акценты на вопросы конструирования [15, 16].

Один из ключевых аспектов, который следует учитывать при анализе конструкций, заключается в том, что любые токи всегда протекают в замкнутых контурах, и всегда – по пути с наименьшим сопротивлением, будет ли этот путь по проводникам или по воздуху (или другому диэлектрику). Сопротивление в данном случае трактуется в зависимости от частоты: на НЧ – это *активное* сопротивление, а на высоких – *полное* сопротивление. Этот факт не всегда очевиден для конструктора, который ранее имел дело с НЧ ЭА, и приступил к разработке высокочастотной (ВЧ) аппаратуры. Закон физики гласит, что ток всегда течет по пути с наименьшим полным сопротивлением, чтобы минимизировать энергию в связанном электрическом и магнитном полях. Если конструктор целенаправленно обеспечит такие пути, то «автоматически» будет обеспечена ЦС и ЦП на должном уровне и выполнены требования ЭМС. Отсутствие должных знаний в области электрофизики заставляют конструктора тратить время на перебор случайных технических решений в поисках лучшего варианта, который может не дать желаемого результата или приведет к значительным временным и материальным затратам. Ситуация может осложниться до тупиковой, если из-за неведения конструктор будет искать решение, пытаясь нарушить физические законы.

Вместо того чтобы бороться с законами физики, следует бороться с собственным недостатком понимания того, как работают законы физики. Как только это будет понято, конструктор можем работать с этими законами с самого начала проекта, чтобы легко и быстро создавать экономически эффективные продукты, которые отвечают требованиям ЦС, ЦП и ЭМС.

Известно, что наиболее полное описание процессов, происходящих в цепях аппаратуры, можно получить с помощью уравнений Максвелла. Но их применение в инженерной практике практически невозможно во всей полноте. Поэтому применяемые методы анализа обосновано упрощают, и на их основе используют инженерные приемы и технические решения. Это приводит к тому, что значительно уменьшается количество итераций проектирования, упрощаются расчетные модели, снижается общая стоимость производства и сокращается время выхода продукта на рынок.

Целостность сигнала, целостность питания и ЭМС тесно связаны между собой. Можно говорить, что хороший с точки зрения ЭМС проект будет обладать наилучшими характеристиками в части ЦС и ЦП. И наоборот, обеспечив ЦС, практически гарантируется выполнение требований двух оставшихся показателей. Это позволяет конструктору сосредоточиться только на одном показателе (например, на ЦС или ЭМС), понимая, что остальные будут реализованы на должном уровне [17, 18].

К сожалению, некоторые специалисты настаивают на низкой стоимости комплектующих, полагая, что это каким-то образом приведет к самым рентабельным решениям. Не имея физического фундамента, трудно бороться с этим опрометчивым и явно неверным подходом. Если аппаратура не проходит сертификационные испытания на соответствие требованиям ЭМС, то потребуются ее серьезная доработка. В результате ряда дополнительных задержек и расходов (например, добавление фильтров и экранов, необходимых для прохождения тестов ЭМС), которые повышают общую стоимость производства и удлиняют сроки выполнения задания, снижается рентабельность и увеличиваются финансовые риски. Чем раньше будут приняты решения по обеспечению ЭМС, тем эффективнее будет в целом процесс создания продукта.

Обеспечение целостности сигнала при конструировании

Рассмотрение электрофизических основ конструирования ЭА невозможно без анализа сигналов в цифровой аппаратуре, поскольку именно их параметры будут определять тот частотный диапазон, в котором работает аппаратура, и определит направления конструкторской реализации.

Цифровой сигнал, в котором происходит изменение напряжения от уровня логического 0 до уровня логической 1 и обратно, богат гармониками, которые отображаются в виде узких спектральных линий при просмотре, например, на анализаторе спектра. Гармонический анализ хорошо проработан и использует прямое и обратное преобразование Фурье для получения спектрального состава сигнала или восстановления сигнала из его спектра. Сигналы могут быть описаны двояко: во временной области в виде зависимости напряжения от времени, и в частотной области в виде набора спектральных составляющих с различными амплитудами, расположенными на оси частот. В реальных сигналах время нарастания определяет фронт сигнала, который, как правило, короче спада. Именно фронт является основным показателем быстродействия, определяющим конструкторские решения, и этот параметр в первую очередь должен интересовать конструктора. Тактовая частота сигнала определяет информационное быстродействие и максимальное значение зависит от длительности фронта и для конструктора является вторичным фактором.

Длительность фронта определяет ширину спектра сигнала. Для большинства практических случаев максимальная частота спектральной составляющей, которую следует учесть для сохранения ЦС, определяется по соотношению

$$f_{\max} = \frac{0,35}{t_r}, \text{ Гц}, \quad (1)$$

где t_r – длительность фронта, с.

Например, для импульсов с фронтом 1 нс максимальная частота, которая должна быть учтена при конструировании ЭА, составит 350 МГц. Если из-за неудачной конструкции линии передачи за счет влияния паразитных параметров, высокочастотные составляющие спектра сигнала, будут потеряны, например, на излучение, то на выходе линии фронт будет иметь большую длительность, то есть будет нарушена ЦС.

Когда резонансные частоты, вызванные паразитными параметрами конструкции, оказываются на тех же частотах, что и гармоники, они «усиливают» эффекты помехового синфазного сопротивления, электромагнитных связей и могут значительно увеличить кондуктивную или излучаемую эмиссию. Чем выше частоты спектральных компонентов, тем эффективнее они излучаются «случайными антеннами», образованными проводящими элементами конструкции и монтажа. Поскольку ширина спектра обратно пропорциональна длительности фронта, то настоятельно рекомендуется не использовать напряжения или токи, которые меняются быстрее, чем это действительно необходимо.

В реальной ситуации линия передачи на печатной плате будет терять энергию из-за связи через паразитные емкости и индуктивности с любыми проводниками, которые находятся рядом, вызывающая перекрестные помехи, а также за счет излучения. Фактически любой проводник можно рассматривать в качестве «случайной антенны», которая излучает ЭМ энергию, и особенно эффективно при резонансах. Это происходит в том случае, если длина трассы составляет четверть длины волны ($\lambda/4$). Гармоники, которые имеют частоты, наиболее близкие к резонансным частотам трассы (когда длина трассы равна нечетному числу четвертей длин волн), вызывают наибольшее число проблем во время тестирования на помехоэмиссию.

По мере накопления опыта проектирования для обеспечения хороших характеристик ЦС, ЦП и ЭМС, конструктор должен уметь определять связь между спектрами излучения и сигналов, которые их вызвали, и применять конструкторские приемы для минимизации излучения от проводящих структур, например, за счет установки помехоподавляющих фильтров и/или экранов.

ЭМС и целостность сигнала

Между проблемами ЦС и ЭМС имеется теснейшая связь. Сигналы, имеющие широкий спектр и ВЧ гармоники в его составе чрезвычайно чувствительны к потере по тем или иным причинам этих ВЧ составляющих в процессе распространения по линиям передачи. Особое влияние на этот процесс оказывают два механизма потерь – потери на нагрев материалов, входящих в состав конструкции линии, и излучение. В свою очередь, излучение при тестировании на ЭМС будет определять уровень помехоэмиссии, который при неудачном техническом решении может превышать предельно допустимый уровень. В этом случае аппаратура должна будет пройти доработку, которая обеспечит прохождение сертификационных тестов. Это показывает, что обеспечение ЦС непосредственно связано с проблемой ЭМС.

Из-за принципа взаимности можно заключить, что линия передачи, которая слабо излучает на критических частотах (то есть на фундаментальной и гармонических частотах спектра), также не будет воспринимать ЭМ энергию от внешних источников, и поэтому ЭА будет иметь хорошую помехозащищенность.

Для аналоговых цепей применяются те же соображения, что и для цифровых цепей. В этом случае проблема заключается в частотной характеристике линии передачи. Если линия, соединяющая два аналоговых устройства, имеет плоскую частотную характеристику по всей полосе пропускания, которая используется для передачи гармонических составляющих, то это является одним из показателей хорошей целостности аналоговых сигналов, а также означает, что излучения будут низкими, а помехоустойчивость высокой.

Целостность питания

Проблема обеспечения целостности питания одна из важнейших при конструировании ЭА. Это объясняется тем, что цифровые ИМС являются мощным источником помех, генерируемых в систему распределения питания ЭА. Эти помехи проявляются в виде пульсаций («ряби») напряжения питания, которые минимизируются определенными конструкторскими и схемотехническими методами, направленными на минимизацию целевого полного сопротивления системы распределения питания узлов ЭА [18]. Роль разработчика заключается в выборе развязывающих конденсаторов, конструкция которых имеет минимальную индуктивность, а значение емкости определяется через допустимый уровень пульсаций. Конструктор, в свою очередь, обязан применить технические решения, направленные на минимизацию индуктивности шины питания и монтажа развязывающих конденсаторов. Поэтому он должен быть осведомлен о физических основах индуктивности и способах управления ей.

В том случае, если пульсации напряжения питания будут превышать допустимый уровень, работа ИМС может происходить со сбоями или со значительными нарушениями ЦС.

Развитие методов конструирования с учетом ЦС, ЦП и ЭМС

Классификация методов анализа ЭА

Понятие «высокое быстродействие» весьма расплывчато и зависит от конкретного проекта. Относительная граница высокого быстродействия может начинаться с частот 50 МГц, когда начинает проявляться частотная зависимость паразитных параметров конструкций. Перспективные цифровые системы должны работать с сигналами, фронты которых составляют доли наносекунд, что соответствует частотам спектральных компонентов в сотни и тысячи мегагерц. Однако большинство конструкторов слабо информированы о тех новых задачах, которые возникают при создании быстродействующей ЭА. Это во многом объясняется рядом причин: отсутствием опыта проектирования быстродействующих устройств и должных знаний в области физических явлений и процессов, которые необходимо учитывать; разрозненностью этапов проектирования (схемотехнических, электрофизических, топологических, технологических); относительно слабой поддержкой САПР таких задач проектирования, как ЦС, ЦП и ЭМС. Следует отметить еще два важных момента. Во-первых, конструирование высокоскоростных узлов ЭА следует рассматривать как часть комплексного этапа проектирования аппаратуры, при котором только совместное рассмотрение схемотехнических, конструкторских и технологических аспектов ее создания позволит достичь успеха. Во-вторых, чем более выверены и обоснованы будут решения на стадии проектирования, тем короче и дешевле будут этапы экспериментальной отработки и тестирования на соответствие требованиям ЭМС. В условиях ограниченных сроков создания перспективных изделий этот фактор имеет решающее значение.

Из-за эффектов распространения волн с учетом частотного диапазона используются три различных подхода при анализе конструкций ЭА, а именно:

- анализ на основе эквивалентных схем на «сосредоточенных элементах», когда размеры объекта намного меньше, чем $\lambda/2\pi$;
- анализ на основе рассмотрения «линии передачи», когда одно измерение длиннее, чем $\lambda/2\pi$ (например, длинный тонкий проводник);
- анализ на основе «полной волны» в двух или трех измерениях, когда эти измерения длиннее, чем $\lambda/2\pi$.

Во всех трех вариантах длина волны λ определяется частотой, представляющей интерес (в большинстве случаев это максимальная частота в спектре сигнала и/или внешнего воздействия, и/или соответствующего теста на ЭМС).

Конструкции случайных антенн (то есть все проводники) наиболее эффективны на своих резонансных частотах, вызывая высокие уровни излучения и обеспечивая плохую помехоустойчивость. Поэтому очень важно контролировать резонансы при проектировании для достижения ЭМС и при необходимости демпфировать их за счет, например, установки фильтров или ферритовых изделий.

Модели на сосредоточенных элементах

При размерах объекта существенно меньше $\lambda/2\pi$ можно использовать методы анализа на «сосредоточенных элементах», которые основаны на рассмотрении эквивалентных схем, построенных на сопротивлениях (R), индуктивностях (L) и емкостях (C). В ряде случаев вместо сопротивлений удобно использовать проводимость (G), особенно при описании свойств диэлектриков. Фактически это обычный анализ цепей, который используется при проектировании принципиальных схем, но при анализе эквивалентных цепей конструкций следует учитывать все паразитные (случайные) элементы R_s , L_s и C_s , которые существуют в разрабатываемой конструкции. Выявление и определение их номинальных значений представляет значительные трудности именно потому, что они случайные, не очевидные, и никоим образом не отражены в документации! Во многом корректный учет паразитных параметров зависит от квалификации конструктора и знания физических законов, которые помогают понять образование паразитных параметров и их роль в функционировании ЭА и обеспечении ЦС, ЦП и ЭМС

Паразитные параметры могут быть внутренними (например, самоиндукция провода) или внешними (например, паразитная емкостная или индуктивная связь из-за близости к другим объектам). Рассмотрим основные свойства элементов, описывающих модели конструкций ЭА, о которых должен быть осведомлен конструктор.

Сопротивление и скин-эффект

Сопротивление проводящей структуры увеличивается с увеличением частоты, из-за скин-эффекта. На ВЧ токи слабо проникают в глубину (толщ) проводника, уменьшая площадь поперечного сечения меди, через которую они протекают, и, следовательно, сопротивление токам увеличивается.

Толщина скин-слоя (δ) представляет собой глубину проникновения тока в толщ металла проводника, при которой плотность тока снизилась до $1/e$ ($e = 2,7$); она рассчитывается как

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}, \text{ м}, \quad (2)$$

где σ – проводимость материала проводника, См/м; f – частота, Гц; μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 1,256$ мкГн/м); μ_r – относительная магнитная проницаемость материала проводника.

Для медных проводников формула имеет вид, удобный для практики:

$$\delta = 66/\sqrt{f}, \text{ мкм}, \quad (3)$$

где f – частота, МГц.

Например, при 160 МГц толщина скин-слоя составит 5 мкм, поэтому на глубине 0,05 мм (10δ) от поверхности проводника плотность тока составит $(1/e)^{10}$ – пренебрежимо малое значение. На этой частоте сопротивление провода диаметром 1 мм увеличивается примерно в 50 раз по сравнению с сопротивлением на постоянном токе из-за примерно в 50 раз меньшей площади поперечного сечения, по которой проходит ток. Кроме того, толщина скин-слоя соизмерима с шероховатостью поверхности проводников, что удлиняет путь поверхностных токов. Это приводит к увеличению потерь в проводниках на ВЧ.

Формула (2), позволяет рассчитать толщину скин-слоя для любых проводящих материалов. Для магнитных материалов глубина скин-слоя является сложной функцией частоты из-за изменения магнитной проницаемости материала с частотой. На более низких частотах глубина скин-слоя этих материалов уменьшается из-за высокого значения μ_r , но между 1 кГц и 1 МГц магнитные свойства снижаются до 0. Поскольку проводимость магнитных материалов значительно меньше, чем у алюминия или меди, глубина скин-слоя у них на частотах выше 1 МГц становится больше. Следует иметь в

виду, что все магнитные материалы теряют свои магнитные свойства при повышении частоты. Чем выше начальная магнитная проницаемость материала, тем на более низких частотах он начинает терять свои магнитные свойства.

Глубина скин-слоя играет очень важную роль в экранировании, поскольку ослабление ЭМ поля, вносимое экраном за счет поверхностного эффекта, обуславливает его потери на поглощение – одна из составляющих эффективности электродинамического экранирования.

Активное сопротивление превращает электрическую энергию в теплоту. Сопротивление не излучает и не накапливает электроэнергию или мощность, как это присуще индуктивности и емкости.

Случайная распределенная индуктивность L

Конструктора должна интересовать случайная (паразитная) индуктивность, которой обладают все токоведущие проводники. Например, тонкая проволока имеет собственную индуктивность около 1 мкГн/м (1 нГн/мм), предполагая, что обратный путь для ее тока расположен очень далеко и не влияет на индуктивность проволоки. Индуктивность проводника проявляется только при изменении тока, протекающего в нем, а индуктивное сопротивление будет расти линейно с увеличением частоты: $X_L = 2\pi fL$. Это может ввести в заблуждение конструктора, поскольку на НЧ индуктивное сопротивление некоторого проводника может быть ничтожно мало, а на ВЧ его сопротивление может вырасти многократно и быть соизмеримо с сопротивлением резисторов, включенных в принципиальную схему. Но этого сопротивления нет на принципиальной схеме, поэтому оно может оказаться за пределами внимания разработчика, а отрицательный эффект от него может оказаться весьма серьезным.

Если путь возвратного тока расположен рядом с прямым проводником, то он будет иметь внешнюю паразитную взаимную индуктивность со своим прямым путем, что уменьшит собственную индуктивность и, таким образом, уменьшит общую индуктивность прямого и возвратного проводника. Вот почему, для обеспечения ЦС, ЦП и ЭМС необходимо располагать токовые пути прямого и возвратного проводника в непосредственной близости по всей их длине, а в идеале – скручивая их вместе в виде витой пары. Это позволяет создать компактную структуру для передачи ВЧ сигналов, которая имеет локальные поля и поэтому является плохой случайной антенной.

Непосредственная близость к ферромагнитным материалам увеличит как самоиндукцию, так и взаимную индуктивность, но близость к проводящим материалам (например, кабелям, металлоконструкциям и т.д.) уменьшит оба параметра.

Физическая природа электрической энергии и электронных сигналов – это распространяющиеся ЭМ волны, которые переносят энергию посредством электрических и магнитных полей. Индуктивность связана с магнитными полями и, следовательно, с передачей (связью) и/или накоплением мощности и энергии в магнитном поле.

Случайная распределенная емкость C

При разработке конструкции представляет интерес случайная (паразитная) емкость. Например, одиночный тонкий проводник в свободном пространстве имеет собственную емкость около 40 пФ на метр длины. Чем больше площадь поверхности проводника, тем больше будет его емкость. Миниатюризация ИМС приводит к уменьшению размеров проводящих элементов, а, следовательно, к уменьшению входных емкостей микросхем. Это сокращает время их перезарядки и приводит к увеличению быстродействия. В общем случае уменьшение паразитных емкостей приводит к увеличению быстродействия цепей.

Непосредственная близость к диэлектрикам с $\epsilon_r > 1$ увеличит все паразитные емкости, как внутренние, так и внешние, а непосредственная близость к другим проводникам увеличит только внешние паразитные емкости.

Емкость связана с электрическими полями, а, следовательно, с передачей (связью) и/или накоплением энергии электрическим полем.

Резонансы LC цепей

Электрическая энергия, связана с электрическими и магнитными полями в конденсаторах и катушках индуктивности являются ли они компонентами принципиальных схем или случайными (паразитными) параметрами конструкции ЭА.

У всех типов цепей, включающих индуктивность L и емкость C (даже, если они паразитные), имеются резонансные частоты, которые «демпфируются» сопротивлением в цепи, которое определяется скин-эффектом. Большее сопротивление означает большую потерю мощности и меньшее значе-

ние добротности Q . Вышеприведенная формула резонанса является упрощенной и не включает в себя член сопротивления, но более полная формула показывает, что сопротивление практически не оказывает влияние на резонансную частоту. Резонансные явления усиливают ЭМ эффекты на резонансных частотах, но определение этих частот в модели конструкции ЭА весьма сложно. Экспериментальные исследования могут помочь в этом вопросе.

Анализ моделей на основе линий передачи

Анализ волнового сопротивления сегментов линии

В дальней зоне отношение E/H такое же, как волновое сопротивление среды, в которой она распространяется. Тот же эффект присутствует в ЭМ волнах, распространяющихся вдоль прямых и возвратных проводников, образующих линию передачи с волновым сопротивлением Z_0 . Эти волны при распространении по линии передачи встречаются на своем пути волновое сопротивление среды, которое формируется емкостными и индуктивными параметрами линии: $Z_0 = (L/C)^{1/2}$.

В первоначальном обзоре основных положений было упомянуто, что изменения в волновом сопротивлении вызывают отражение доли энергии, распространяющейся ЭМ волны. Энергия отраженной волны – это энергия, которая не передается от источника к нагрузке, что приводит к искажению формы сигнала, получаемой нагрузкой, – одна из важнейших составляющих проблемы ЦС. Аналогичная проблема возникает и в цепях питания. В любом случае отражения возникают при несовпадении волнового сопротивления линии передачи или шины питания с полным сопротивлением нагрузки. Отраженная энергия ЭМ волн заставляет проводящие структуры вести себя как более эффективные случайные антенны, вызывая проблемы ЭМС из-за увеличения излучения и снижения помехоустойчивости.

Изменения волнового сопротивления, которые происходят на длине менее примерно $\lambda/10$, мало влияют на отражение, поэтому анализ линии передачи состоит из анализа линии в виде набора сегментов, каждый из которых имеет длину $\lambda/10$, включая источник и нагрузку, и определения волнового сопротивления каждого сегмента. Это позволяет определить, как волна будет распространяться от источника к нагрузке, и как это повлияет на ее форму и характеристики ЦС, ЦП и ЭМС. Следует помнить, что при уменьшении скорости из-за увеличения магнитной и/или диэлектрической проницаемости материала среды распространения сигнала, длина волны для определенной частоты становится короче, поэтому длина участка $\lambda/10$ пропорционально сокращается. Когда проводники линии полностью окружены однородной средой, диэлектрическая проницаемость, которая используется для определения емкости, будет равна диэлектрической проницаемости этой среды. Но, когда среда, в которой расположена линия передачи кусочно-однородная (например, микрополосковая линия на поверхности печатной платы, окруженная с одной стороны диэлектриком основания платы, а с другой воздухом), то необходимо использовать эффективную диэлектрическую проницаемость как некоторое усредненное значение проницаемости сред.

Эффекты постоянства волнового сопротивления

Если постоянное значение волнового сопротивления поддерживается для каждого сегмента проводника, а также для полных сопротивлений источника и нагрузки, то 100% энергии ЭМ волны передается от источника к нагрузке (игнорируя потери, связанные с сопротивлением). Это согласованный режим работы линии передачи. В этом режиме теряется очень мало энергии, отлично поддерживается ЦС, и конструкция должна иметь очень низкую эффективность как случайной антенны, а поэтому обладает низкой помехоэмиссией и хорошей помехоустойчивостью. Примером конструкций линий передачи с постоянным волновым сопротивлением являются электрически длинные линии на МПП, которые имеют волновое сопротивление 50 Ом. Эти линии обязательно должны быть согласованы. Коаксиальные кабели в ЭА имеют волновое сопротивление 50 и 75 Ом, а кабели в виде витых пар – 120 Ом, что также требует согласования при их использовании. Выявление электрически длинных линий после трассировки требует итерационного процесса выбора и применения схем согласования линий и корректировки топологии.

При разработке экранов подбирают материалы, которые имеют минимальное волновое сопротивление. За счет этого обеспечивается максимальная разница с волновым сопротивлением свободного пространства (377 Ом), что определяет максимальное отражение падающей ЭМ волны от стенки экрана. Проводящие материалы обладают предельно низким (на уровне микроом) волновым сопротивлением, и поэтому только они применяются для создания ЭМ экранов.

Анализ резонансов методом линий передачи

Особая ситуация возникает на частоте, на которой длина проводника равна целому числу полуволн. Это условие возникновения резонанса. Это приводит к появлению стоячей волны вдоль проводника. Наличие стоячей волны приводит к тому, что проводник ведет себя как очень эффективная случайная антенна. Для проводника в воздухе (или в вакууме) в **Ошибка! Источник ссылки не найден.** относительные проницаемости ϵ_r и μ_r принимаются равными 1. Так, проводник длиной 1 м в воздухе будет резонировать при 150, 300, 450 МГц и т.д. Именно на этих частотах будет максимальный уровень помехозащиты и минимальный – помехозащищенности. Для произвольной среды учитываются параметры среды. Например, для линии 0,1 м на внутреннем слое платы с основанием FR4 ($\epsilon_r = 4,2$, $\mu_r = 1$) резонансные частоты будут примерно 750, 1500, 2150 МГц и т.д.

Когда проводник имеет нагрузки с различными по отношению к Z_0 значениями на каждом конце, резонансы стоячей волны возникают на частотах, на которых длина проводника составляет нечетное число четвертей длин волн.

Для детального анализа линии передачи существуют так называемые «телеграфные уравнения». В инженерной практике их применение представляет определенные трудности.

Полноволновый анализ

Когда проводящий элемент длиннее $\lambda/6$ в двух или трех измерениях, приближенный анализ применим только для очень простых ситуаций, например, при рассмотрении плоской пластины и пустого металлического бокса. Для любой разумной точности для реальных условий и оборудования следует использовать «полноволновый анализ», основанный на упрощениях уравнений Максвелла. Это практически только при использовании компьютерного моделирования.

Место и стратегия проектных решений

Потребность в создании ЭА высокого быстродействия изменила философию проектирования. Повышение быстродействия требует представлять конструкцию аппаратуры как некоторый распределенный элемент электрической схемы, который во многом определяет ее функционирование. В настоящее время при создании ЭА на первое место выходят требования к ЦС, ЦП и ЭМС. Чем раньше будет принято решение по удовлетворению тех или иных требований ЦС, ЦП и ЭМС, тем меньше будут итоговые затраты и сроки создания аппаратуры. Эта концепция носит название «сдвиг влево», то есть смещение ответственных решений ближе к началу проектных работ. Для реализации этой концепции конструктор должен обладать знаниями о процессах и явлениях, относящихся к более ранним стадиям создания аппаратуры, например, к концептуальным и схемотехническим аспектам цифровой обработки информации, механизмах работы цифровых интегральных микросхем, методах моделирования и т.п. Конечно, конструктор не должен заменять соответствующих специалистов, но он обязан квалифицировано взаимодействовать с ними. Фундаментом рациональных конструкторских решений является знание физических законов и практических выводов, вытекающих из них.

Успехи в развитии микроэлектроники и корпусировании кристаллов микросхем привели к созданию компонентов с большим числом выводов, высокой степени интеграции и высоким быстродействием, что непосредственно влияет на топологию и электрические параметры печатных плат и печатных узлов. Высокое быстродействие печатных узлов требует решения новых задач по его обеспечению, препятствием для которого являются во многих случаях паразитные электрические параметры корпусов микросхем, печатных плат, кабелей и жгутов, а также конструкции в целом.

Конструктор должен обладать расширенными знаниями об этапах проектирования аппаратуры, для возможно более полного учета электрофизических параметров и характеристик компонентов и материалов, формирующих среду передачи сигналов.

Обеспечение ЭМС при конструировании ЭА

Помехозащита относится к потенциальной генерации помех и перенос их к рецептору по полю или по проводникам (например, питания). Помехозащита жестко контролируется при сертификационных испытаниях аппаратуры и ограничена требованиями соответствующих стандартов. Целью управления помехозащитой при создании аппаратуры является ограничение излучаемой ЭМ энергии и тем самым «загрязнения» ЭМ среды, в которой должны работать другие ТС. Снижение помехозащиты от одного ТС может устранить проблему ЭМС для многих других совместно работающих ТС.

Восприимчивость – это способность устройства или схемы реагировать на нежелательную ЭМ энергию (то есть помеху). Противоположностью восприимчивости является помехоустойчивость. Уровень помехоустойчивости цепи или устройства можно оценить ЭМ средой, в которой оборудование может работать удовлетворительно. Помехоустойчивость обеспечивается средствами, необходимыми только для выполнения требуемых заданием функций. С учетом дополнительных схемно-конструкторских мер, например, установкой фильтров или экранированием потенциальная помехоустойчивость может быть развита до помехозащищенности. Для специальной аппаратуры частот используется термин «стойкость» для определения способности ТС работать в условиях мощных ЭМ воздействий.

В некоторой степени восприимчивость является саморегулирующейся. Если продукт подвержен воздействию ЭМ среды, пользователь узнает об этом по результатам функционирования и не может использовать этот продукт, если отмечены сбои или отказы. Эмиссия, однако, не является саморегулируемой. Продукт, являющийся источником излучений, сам по себе не может быть затронут этим излучением, но может существенно повлиять на работу соседних ТС. Поэтому разработаны правила (стандарты, директивы) ЭМС по ограничению помехоэмиссии, которым продукт должен соответствовать, прежде чем его можно будет продать или передать заказчику. Эти правила контролируют допустимые излучения и в некоторых случаях определяют степень помехозащищенности.

К конструированию с учетом ЭМС можно подходить любым из двух способов: один – это кризисный подход, а другой – системный подход. При кризисном подходе конструктор полностью игнорирует проблему ЭМС до тех пор, пока продукт не завершен, и тестирование – или еще хуже – опыт работы на местах показывает, что проблема ЭМС существует. Решения по обеспечению ЭМС, реализуемые на этом позднем этапе, обычно дороги и состоят из нежелательных «дополнений». По мере прохождения стадий от проектирования до тестирования и производства уменьшается разнообразие методов устранения помех, доступных для конструктора. Одновременно растет стоимость доработки и изменений. Поэтому решение проблем ЭМС на начальных стадиях проектирования, как правило, является лучшим и наименее дорогим вариантом, а кризисный подход – ошибочным.

Системный подход учитывает ЭМС на всех стадиях проектирования; конструктор предвидит проблемы ЭМС в начале процесса конструирования, находит остающиеся проблемы при макетировании и на ранних стадиях прототипирования, тестирует окончательные прототипы для проверки показателей ЭМС настолько тщательно, насколько это возможно. Таким образом, ЭМС становится неотъемлемой частью электрических, механических, тепловых, а в некоторых случаях и программных этапов проектирования. В результате доработка продукта по показателям ЭМС на завершающих стадиях сводится к минимуму. Такой подход является наиболее желательным и рентабельным.

Если задачи ЭМС и подавления помех рассматриваются на начальных стадиях конструирования, то требуемые методы обеспечения ЭМС, как правило, просты и понятны. Опыт показал, что, когда поступают таким образом, конструктор, владеющий приемами проектирования с учетом ЭМС, должен иметь возможность создать оборудование с 90% устраненных до первоначального тестирования потенциальных проблем. Система, разработанная с полным игнорированием ЭМС, почти всегда будет иметь проблемы, когда начинается тестирование. Анализ завершенной конструкции, чтобы найти приемлемое решение по устранению помех и выполнению требований ЭМС, не прост и не очевиден. Решения на поздней стадии обычно включают установку дополнительных помехоподавляющих компонентов и/или экранов, которые не являются неотъемлемыми частями схемы. При этом экономические и временные потери включают дополнительные расходы на перепроектирование и тестирование, а также на стоимость таких компонентов и/или экранов. Все это может привести к увеличению размера и массы изделия, а в некоторых случаях и к увеличению мощности потребления.

Заключение

Анализ проблемы конструирования перспективной быстродействующей ЭА позволяет сделать некоторые выводы.

1. Развитие методологии конструирования должно быть в направлении фундаментальных проблем целостности сигнала, целостности питания и ЭМС. Комплекс возникающих при этом задач охватывает стадии разработки и конструирования функциональных узлов, рассматривая техническое средство как единый объект электродинамического анализа.

2. При анализе конструкций могут использоваться различные модели при обоснованности их применения. Целесообразно начинать анализ с простейших моделей, усложняя их при необходимости.
3. Смена философии конструирования требует корректировки учебных планов при подготовке конструкторов ЭА, подготовке принципиально новых учебников и учебных пособий, а также развития системы повышения квалификации практикующих конструкторов.
4. В целях развития данного научного направления целесообразно в профильных вузах, осуществляющих подготовку специалистов (бакалавров, магистров, аспирантов), по разработке и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры предусмотреть курс (раздел курса) по электромагнитной совместимости.
5. Целесообразно на предприятиях, занимающихся разработкой электронной аппаратуры, создать службу внутрисистемной ЭМС, в задачи которой должен входить надзор за соблюдением норм и правил обеспечения ЭМС на всех стадиях создания технических средств, координация этих мероприятий между разработчиками и конструкторами, разработки внутренних руководящих материалов по обеспечению ЭМС, базирующихся на знаниях особенностей собственной продукции и ее сопровождение на всех стадиях жизненного цикла. Это должно позволить повысить вероятность прохождения тестирования на ЭМС наиболее рентабельными методами и обеспечить высокое качество функционирования в сложной электромагнитной обстановке.

Список литературы

1. Bogatin E. Signal Integrity – Simplified. Prentice – Hall PTR, 2003. – 608 p.
2. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. – Prentice Hall PTR. 2003. – 432 p.
3. IPC-2141A. Design Guide for High-Speed Controlled Impedance Circuit Boards. – 2004. – 47 p.
4. IPC-2251. Design Guide for the Packaging of High Speed Electronic Circuits. November 2003. – 90 p.
5. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons. – 2009. – 844 p.
6. Armstrong K. Advanced PCB design and Layout for EMC. Part 4 – Reference Planes for 0 V and power. EMC&Compliance Journal, 2001, p. 13 – 43
7. Armstrong K. Advanced PCB design and Layout for EMC. Part 6 – Transmission Lines – 3rd. EMC&Compliance Journal, 2001, p. 1 – 30.
8. Armstrong K. Design Techniques for EMC. Pt. 2. Cables and Connectors. [Текст] – Compliance Journal. – 2006, № 64. – P. 23–34.
9. Armstrong K. The Physical Basis of EMC. – EMC Standarts. – 2010. – 80 p.
10. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: ООО «Издательский дом «Технологии», 2004. – 508 с.
11. Dash G. A Dash of Maxwell's. A Maxwell's Equations Primer. Part 1: An Introduction. – IN Compliance 2011 Annual Guide. – 2011. – P. 26–35.
12. Paul C.R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. – Wiley Inter Science, 1992 – 766 p.
13. Ramo, S. Fields and waves in communication electronics / Simon Ramo, John R. Whinnery, Theodore Van Duzer. – 3rd ed. – John Wiley&Sons, Inc., 1994. – 858 p.
14. Рамо С., Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 631 с.
15. White, Donald R. J. A Handbook on Electromagnetic Interference and Compatibility, Volume 3. Gainesville, Va: Don White Consultants, 1987. – 870 p.
16. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – М.: Грифон, 2017. – 424 с (Библиотека ЭМС).
17. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры (Монография). – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
18. Кечиев Л.Н. Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. – М.: Грифон, 2016. – 400 с. – (Библиотека ЭМС).

Московский институт электроники и математики НИУ «Высшая школа экономики», департамент электронной инженерии (МИЭМ НИУ ВШЭ, ДЭИ); Российская Федерация, Москва, 123458, Таллинская ул., д. 8.

Военная академия Ракетных войск Стратегического назначения имени Петра Великого. Российская Федерация, 143900. г. Балашиха Московская обл., ул Карбышева

ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России по научной работе; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26, 141307.

ФГКВОУ ВПО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева», Российская Федерация, 191123, Военный институт (инженерно-технический) ВА МТО, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22.

ФГУП «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева», 105064, Москва, ул. Казакова, 16, Российская Федерация.

Авторы

Кечиев Леонид Николаевич, д.т.н, профессор, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики НИУ «Высшая школа экономики»; Российская Федерация Москва, 123458, Таллинская ул., д. 34. lkechiev@hse.ru.

Любомудров Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, инспектор группы инспекторов Министерства обороны РФ. Военная академия Ракетных войск Стратегического назначения имени Петра Великого. Российская Федерация. 143900. г. Балашиха Московская обл., ул Карбышева, 8 lubomudrov31@mail.ru тел. 89104154929.

Сахаров Михаил Викторович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России по научной работе; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26, 141307.

Фоминич Эдуард Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования, электрооборудования и автоматики Военного института (инженерно-технического) ФГКВОУ ВПО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева», Российская Федерация 191123, Военный институт (инженерно-технический) ВА МТО, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22., efominich@mail.ru, тел. +7(921)906-38-33.

Мырова Людмила Ошеровна, д.т.н., профессор, научный консультант генерального директора, «ФГУП НИИР» – ФГУП «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева», 105064, Москва, ул. Казакова, 16; Российская Федерация; www.niir.ru.

Kechiev L.N., Lyubomudrov A.A., Sakharov M.V., Fominich E.N., Myrova L.O.

Problems of designing electronic equipment taking into account electromagnetic compatibility

Abstract. The issues of designing electronic equipment at the present stage of development of electronic tools are considered. The most urgent design tasks are highlighted: ensuring signal integrity, ensuring power integrity, electromagnetic compatibility. The solution to these problems requires developers and designers to have a deeper understanding of the electrophysical processes that occur during the propagation of an information signal along transmission and supply along the power bus. The main directions that require solutions in the design of equipment are identified. The necessity of improving the system of training and retraining of relevant specialists, as well as the creation of a department of intra-equipment electromagnetic compatibility at enterprises involved in the development of technical means, is noted.

Keywords: electronic equipment, design, electromagnetic compatibility, signal integrity, power integrity, education, advanced training

References

1. Bogatin E. Signal Integrity – Simplified. Prentice – Hall PTR, 2003. – 608 p.
2. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. – Prentice Hall PTR. 2003. – 432 p.
3. IPC-2141A. Design Guide for High-Speed Controlled Impedance Circuit Boards. – 2004. – 47 p.
4. IPC-2251. Design Guide for the Packaging of High Speed Electronic Circuits. November 2003. – 90 p.
5. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons. – 2009. – 844 p.
6. Armstrong K. Advanced PCB design and Layout for EMC. Part 4 – Reference Planes for 0 V and power. EMC&Compliance Journal, 2001, p. 13 – 43
7. Armstrong K. Advanced PCB design and Layout for EMC. Part 6 – Transmission Lines – 3rd. EMC&Compliance Journal, 2001, p. 1 – 30.
8. Armstrong K. Design Techniques for EMC. Pt. 2. Cables and Connectors. [Текст] – Compliance Journal. – 2006, № 64. – P. 23–34.
9. Armstrong K. The Physical Basis of EMC. – EMC Standarts. – 2010. – 80 p.
10. Uill'iams T. *EMS dlia razrabotchikov produktsii* [EMC for product designers]. Moscow: OOO «Izdatel'skii dom «Tekhnologii», 2004. 508 p. (In Russian)
11. Dash G. A Dash of Maxwell's. A Maxwell's Equations Primer. Part 1: An Introduction. – IN Compliance 2011 Annual Guide. – 2011. – P. 26–35.
12. Paul C.R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. – Wiley Inter Science, 1992 – 766 p.
13. Ramo S., Uinneri Dzh. *Polia i volny v sovremennoi radiotekhnike* [Fields and waves in modern radio engineering]. Moscow. – L.: OGIZ, 1948. 631 p. (In Russian)
14. White, Donald R. J. A Handbook on Electromagnetic Interference and Compatibility, Volume 3. Gainesville, Va: Don White Consultants, 1987. 870 p.
15. Kechiev L.N. *Pechatnye platy i uzly gigabitnoi elektroniki* [Printed Circuit Boards and Gigabit Electronics]. Moscow.: Grifon, 2017. 424 p. (In Russian)
16. Kechiev L.N. *Proektirovanie pechatnykh plat dlia tsifrovoi bystrodeistvuiushchei apparatury (Monografiia)* [Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment (Monograph)]. – Moscow.: OOO "Gruppa IDT", 2007. – 616 p. (In Russian)
17. Kechiev L.N. *Proektirovanie sistemy raspredeleniia pitaniia pechatnykh uzlov elektronnoi apparatury* [Design of a power distribution system for printed units of electronic equipment]. – Moscow.: Grifon, 2016. – 400 p. (In Russian)

Moscow Institute of Electronics and Mathematics NRU «Higher School of Economics», Department of Electronic Engineering (MIEM NRU HSE, Dei); Russian Federation Moscow, 123458, Tallinn Street, 34.

Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Forces. Russian Federation, 143900. Balashikha, Moscow region, Karbysheva st.

FGKU "12 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of Russia on scientific work; Russian Federation, Moscow region, Sergiev Posad, ul. Spring, 2b, 141307.

FGKVOU VPO «Military Academy of Logistics of the Name of the Army General A.V. Khruleva», Russian Federation, 191123, Military Institute (Engineering) of the Moscow Military Technical University, St. Petersburg, ul. Zakharyevskaya, d. 22.

Radio Research and Development Institute (NIIR), 16 Kazakova str., Moscow Russian Federation, 105064, Russian Federation.

Authors

Kechiev Leonid Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of Department of Electronic Engineering, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics; Russian Federation Moscow, 123458, Tallinn Street, 34.

Lyubomudrov Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Inspector of the Inspector Group of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Military Academy of the Rocket Forces of the Strategic Destination named after Peter the Great. Russian Federation. 143900. Balashikha, Moscow region, Karbysheva street, 8 lubomudrov31@mail.ru tel. 89104154929.

Sakharov Mikhail Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Federal State Institution "12 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of Russia for scientific work; Russian Federation, Moscow Region, Sergiev Posad, ul. Spring, 2b, 141307.

Fominich Eduard Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Power Supply, Electrical Equipment and Automation of the Military Institute (Engineering) of the FSBEI HPE Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khruleva, Russian Federation 191123, Military Institute (Engineering) of the Moscow Military Technical University, St. Petersburg, ul. Zakharyevskaya, d. 22., efominich@mail.ru, tel. +7 (921) 906-38-33.

Myrova Lyudmila Osherovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Advisor to the Director, the M.I.Krivosheev Radio Research and Development Institute (NIIR), 16 Kazakova str., Moscow Russian Federation, 105064, Russian Federation; www.niir.ru.

УДК 621.316

Н.В. Балюк, С.Ф. Перцев, С.Д. Орлов

Электромагнитные факторы среды и научно-методическое обеспечение испытаний образцов ВВТ

Рассмотрены проблемные вопросы испытаний образцов вооружения и военной техники на соответствие требованиям стойкости и безопасности в современных условиях. Основными направлениями деятельности в данной области являются: совершенствование средств испытаний; корректировка нормативной базы; развитие научно-методического обеспечения испытаний.

Технические возможности средств испытаний позволяют проводить испытания широкой номенклатуры образцов вооружения и военной техники на действие электромагнитных факторов. Модернизация экспериментальной базы проводится в рамках государственного оборонного заказа.

В области корректировки нормативной базы основные проблемы связаны с координацией работ по разработке стандартов. Недостаточны темпы обновления нормативных документов, регламентирующих требования и методы испытаний; недостаточен уровень гармонизации документов.

Появление нового испытательного оборудования и новых стандартов обуславливает необходимость разработки методик испытаний. Кроме того, развитие научно-методического обеспечения, в том числе расчетно-экспериментальных методов оценки электромагнитной стойкости и безопасности образцов вооружения и военной техники, позволяет расширить возможности испытательного оборудования, повысить качество испытаний.

Ключевые слова: испытания объектов, стойкость, экспериментальная база, нормативные документы

Актуальность дальнейшего совершенствования экспериментально-испытательной базы (ЭИБ) и обеспечение испытаний образцов вооружения и военной техники (ВВТ) в условиях воздействия электромагнитных факторов (ЭМФ) в целом обусловлена:

- появлением новых моделей ядерного удара и совершенствованием ядерного оружия;
- изменением уровней внешних факторов, действующих на образцы ВВТ, с учетом новых моделей и тактики их применения;
- появлением новых научных данных о процессах, происходящих при взрыве, развитием физико-математических моделей, описывающих данные процессы;
- необходимостью разработки методов оценки соответствия образцов ВВТ в связи с новыми требованиями стойкости в нормативных документах (НД);
- прогнозированием поражающих факторов средств противника, которыми он будет воздействовать на наши образцы ВВТ;
- отсутствием методологии решения проблемы электромагнитной стойкости образцов ВВТ с позиций вероятностно-параметрического подхода (изложенные в стандартах методы оценки стойкости сводятся к испытаниям на параметры, заданные в ТТЗ, с единственным критерием «есть отказ – нет отказа»).

В зарубежных исследованиях результаты воздействия электромагнитных факторов на системы вооружения и военной техники заложены в требованиях стойкости и безопасности для образцов и систем воздушного, морского, космического и наземного базирования, включая их средства вооружения.

Стандарты определяют электромагнитное воздействие как воздействие сложной электромагнитной обстановки на боеспособность вооруженных сил, оборудование, системы и носители и охва-

тывают все электромагнитные факторы, включая требования электромагнитной совместимости, электромагнитные поля высокой интенсивности, электромагнитный импульс (ЭМИ) ядерного взрыва (ЯВ), опасные электромагнитные воздействия на личный состав, боеприпасы и летучие вещества, а также электромагнитные явления природного происхождения – молния, магнитные бури и электростатические разряды [1–6].

В 2019 г. в США принята новая программа по защите «критической инфраструктуры» страны от воздействия электромагнитного импульса. Основное внимание уделено координации работ по проведению НИОКР, испытаний и разработке технологии защиты систем и инфраструктуры Министерства обороны от воздействия ЭМИ [7].

Работы в 12 ЦНИИ в данной области ведутся по следующим основным направлениям:

- совершенствование ЭИБ;
- развитие научно-методического обеспечения испытаний;
- корректировка нормативной базы [8–12].

По первому направлению в 12 ЦНИИ решаются задачи по оценке состояния ЭИБ, заданию требований к новым установкам, военно-научному сопровождению создания установок-имитаторов и реконструкции инфраструктуры ЭИБ, развитию лабораторно-испытательной базы и средств метрологического обеспечения.

Направление научно-методического обеспечения включает в себя разработку методов экспериментальных исследований, методик испытаний и измерений, совершенствование комплекса численных алгоритмов и реализующего их программного обеспечения для математического моделирования, расчета параметров, воздействующих ЭМФ и оценки реакции объектов испытаний.

По третьему направлению – 12 ЦНИИ участвует в корректировке нормативных документов как в части задания требований стойкости, так и в части методологии оценки соответствия требованиям стойкости и безопасности в условиях воздействия внешних факторов.

Рассмотрим проблемы, имеющиеся по этим направлениям, пути их решения, перспективы развития испытательного комплекса и системы испытаний в целом.

1. Направления по совершенствованию ЭИБ

Одним из обязательных требований, предъявляемых к разрабатываемым образцам ВВТ, является обеспечение их стойкости (как способности сохранять возможность выполнения задач по предназначению) при воздействии и после воздействия поражающих электромагнитных факторов.

Стойкость, безопасность эксплуатации, надежность образца ВВТ влияют на его эффективность и в целом на выполнение боевой задачи.

В связи с этим при разработке ТТЗ на перспективные образцы вооружения осуществляется формирование требований стойкости к воздействию поражающих электромагнитных факторов.

Оценка соответствия образцов ВВТ требованиям стойкости осуществляется путем их испытаний с использованием установок-имитаторов, моделирующих поражающее действие электромагнитного импульса ядерного взрыва. Научно-технической и информационной основой при разработке моделирующих установок являются результаты натурных испытаний, проведенных на полигонах Министерства обороны.

Для проверки стойкости образцов ВВТ к поражающему действию ЭМИ ЯВ используют следующий методический подход. Объект последовательно испытывают на соответствие требованиям стойкости к воздействию вертикальной или горизонтальной компоненты электромагнитного импульса. Однако, очевидно, что совместное действие компонент ЭМИ может привести к усилению общего воздействия. В связи с этим разрабатываются установки-имитаторы ЭМИ совместного действия вертикальной и горизонтальной компонент электромагнитного импульса.

Установки-имитаторы, моделирующие действие ЭМИ ядерного взрыва, сосредоточены в основном на экспериментально-испытательной базе 12 ЦНИИ Минобороны России.

Экспериментально-испытательная база 12 ЦНИИ располагает полным комплексом установок для воспроизведения в соответствии с нормативными документами электромагнитных полей, токов и напряжений источников естественного и искусственного происхождения и обеспечивает в Министерстве обороны комплекс испытательных работ по контролю стойкости и безопасности вооружения, военной и специальной техники.

С использованием установок-имитаторов испытательного комплекса 12 ЦНИИ проводятся испытания и исследования, направленные на:

- подтверждение требований стойкости образцов ВВТ к действию ЭМИ ЯВ, электромагнитных полей и токов источников естественного и искусственного происхождения;
- изучение эффектов воздействия электромагнитного излучения на образцы ВВТ и оценку их соответствия требованиям стойкости, а также определение физических механизмов повреждения радиоэлектронной аппаратуры, входящей в состав образцов ВВТ.

В настоящее время изменились требования нормативно-технической документации к перспективным образцам вооружения и военной техники. В связи с этим в современных условиях актуальным и единственным способом обеспечения испытаний образцов ВВТ на действие электромагнитных факторов является разработка новых и совершенствование существующих установок-имитаторов.

Таким образом, развитие испытательного комплекса 12 ЦНИИ является одним из приоритетных направлений деятельности по повышению качества разрабатываемых образцов вооружения. При этом совершенствование технической части испытательного комплекса (средств испытаний) необходимо рассматривать в тесной взаимосвязи с вопросами развития нормативной базы, научно-методического обеспечения, подготовки квалифицированного научно-технического персонала, а также с вопросами взаимодействия организаций оборонно-промышленного комплекса и Минобороны при задании и подтверждении требований стойкости перспективных образцов ВВТ.

Целью развития экспериментальной базы 12 ЦНИИ является обеспечение испытаний создаваемых образцов ВВТ на соответствие требованиям стойкости к электромагнитным факторам для принятия этих образцов в Министерстве обороны РФ на вооружение.

Следует отметить высокую потребность в проведении испытаний: ежегодно проводится порядка сотни испытаний образцов ВВТ на разные виды воздействий. Так, за последние 3 года проведено более 300 испытаний образцов ВВСТ и около двух сотен исследовательских испытаний в обеспечение КНИР. Испытаны стратегические объекты, оперативно-тактические комплексы, комплексы ПВО, образцы бронетанковой техники и ракетно-бомбового вооружения.

В результате испытаний определены уровни стойкости образцов ВВТ к воздействию внешних электромагнитных факторов, оценено их соответствие требованиям ТТЗ, проведены необходимые доработки для дальнейшего принятия на вооружение.

На ближайшую перспективу направлениями развития экспериментальной базы являются:

- совершенствование методов испытаний;
- улучшение характеристик испытательных установок, расширение их возможностей при оценке стойкости образцов ВВСТ;
- поддержание в работоспособном состоянии инфраструктуры ЭИБ.

Основные мероприятия по разработке установок-имитаторов и модернизации испытательного комплекса 12 ЦНИИ проводятся в рамках государственного оборонного заказа (ГОЗ).

Общей проблемой при проведении мероприятий, запланированных в рамках ГОЗ, является перенос сроков их выполнения.

В настоящее время актуальны следующие проблемные вопросы формирования состава ЭИБ:

1. Разработка средств воспроизведения электромагнитных полей высокой интенсивности для испытаний образцов ВВТ на стойкость к действию ЭМФ.
2. Разработка расчетно-экспериментальных методов подтверждения требований стойкости.

Следует отметить, что в настоящее время одним из основных методов испытания объектов ВВТ на действие ЭМФ является расчетно-экспериментальный метод. В отличие от классического экспериментального метода, в этом случае применяются методы численного моделирования физических процессов, происходящих при воздействии ЭМФ на объекты. Современные численные методики базируются на детальном описании конструктивных особенностей объектов испытаний и более полном учете происходящих физических процессов. Для обеспечения требуемой высокой точности теоретического прогноза показателей стойкости объектов испытаний создаваемые численные методы должны в обязательном порядке проходить экспериментальную проверку.

Направлениями развития экспериментально-испытательной базы ЭМИ в настоящее время являются: реконструкция комплекса испытательной площадки и разработка крупногабаритного имита-

тора ЭМИ высотного ЯВ произвольной поляризации. В рамках плановых НИР проводятся работы, направленные на обеспечение испытаний крупногабаритных стратегических объектов.

Реализация запланированных мероприятий позволит обеспечить экспериментальные исследования по оценке воздействия ЭМИ ЯВ на перспективные образцы ВВТ и повысить достоверность результатов испытаний.

Для подготовки и проведения испытаний образцов ВВТ на стойкость и безопасность к действию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения созданы специальные экспериментальные установки и испытательные комплексы. Размещение генераторов импульсного напряжения и токов на автомобильных шасси позволяет проводить испытания объектов в местах их постоянной дислокации.

Экспериментально-испытательная база ЭМФ естественного и искусственного происхождения развивается в направлении создания мобильных испытательных комплексов электромагнитных полей радиотехнических средств, что позволит испытывать крупногабаритные образцы ВВТ в местах их дислокации. В дальнейшем планируются работы по модернизации комплекса имитаторов полей РТС в направлении расширения диапазона частот.

В целом в результате проводимых и запланированных мероприятий по модернизации испытательного оборудования ЭИБ 12 ЦНИИ и реконструкции ее инфраструктуры будут существенно увеличены возможности ЭИБ по натурному воспроизведению электромагнитных факторов. К 2025 году будут созданы новые установки, комплексы и стенды, воспроизводящие испытательные воздействия в соответствии с требованиями нормативных документов Минобороны.

Однако проблемным вопросом по данному направлению остается недостаточная координация деятельности по модернизации ЭИБ, осуществляемой в рамках ГОЗ.

2. Проблемные вопросы научно-методического обеспечения испытаний образцов ВВТ на действии поражающих факторов

Важным направлением деятельности по обеспечению испытаний образцов ВВТ является проведение научных исследований по разработке методик испытаний. Необходимость таких исследований связана с появлением нового испытательного оборудования, ограниченными возможностями существующих установок.

В рамках данного направления исследований перспективными является разработка:

- способа комплексного нагружения образцов ВВТ электромагнитными полями произвольной поляризации при испытаниях на действие ЭМИ высотного ЯВ;
- комплекса методик поверки рабочих средств измерений и методик выполнения измерений для обеспечения исследований в рамках плановой тематики;
- методик измерений параметров нагружения образцов ВВТ при их испытаниях на соответствие требованиям стойкости к действию ЭМИ;
- научно-методического аппарата для обеспечения испытаний крупногабаритных образцов вооружения, военной и специальной техники;
- комплекса трехмерных численных алгоритмов и реализующего их программного обеспечения для математического моделирования и расчета параметров воздействия электромагнитных излучений высокой интенсивности на объекты заданной конструкции в условиях боевого применения;
- типовой методики проведения испытаний образцов подвижной наземной военной техники по оценке уровня защиты от ЭМИ.

Процесс задания требований стойкости и оценки соответствия данным требованиям

Направления работы по совершенствованию нормативно-методического обеспечения испытаний определяются его ролью при обеспечении стойкости разрабатываемых образцов вооружения к внешним воздействиям.

В целом порядок создания ВВТ в соответствии с комплексом требований, предъявляемых к создаваемому образцу, включает ряд этапов, начиная с формирования ТТЗ и заканчивая этапом подтверждения соответствия заданным требованиям.

Процесс задания требований стойкости и оценки соответствия этим требованиям, является неотъемлемой частью процесса создания образца вооружения и включает:

- подготовку и переподготовку специалистов;
- обоснование требований стойкости к ЭМФ на этапе разработки ТТЗ, нормативных документов (включая развитие физико-математических моделей, типизацию характеристик воздействующих на объект ЭМФ);
- совершенствование экспериментальной базы, методов испытаний (сюда же можно отнести развитие расчетно-экспериментальных методов оценки соответствия ВВТ заданным требованиям стойкости);
- разработку программы обеспечения стойкости;
- контроль соответствия разрабатываемого образца ВВТ требованиям стойкости и безопасности;
- формирование базы данных по результатам испытаний.

Направления деятельности по совершенствованию нормативно-методического обеспечения испытаний

Деятельность по совершенствованию нормативно-методического обеспечения испытаний образцов ВВТ на действие электромагнитных факторов непосредственно связана со следующими направлениями исследований:

- разработка новых моделей взаимодействия ЭМФ с объектами;
- оценка уровней внешних факторов, действующих на образцы ВВТ;
- включение в стандарты новых видов воздействий – полей высокой интенсивности;
- разработка вероятностных методов оценки соответствия образцов ВВТ новыми требованиями стойкости.

Результаты работы по этим направлениям учитываются при корректировке нормативных документов в области испытаний, которая проводится регулярно, каждые 10 лет. При этом осуществляется уточнение состава групп вооружения, состава поражающих факторов и требований стойкости к ЭМФ.

3. Проблемные вопросы в области стандартизации оборонной продукции

Задание и подтверждение требований стойкости образцов к действию поражающих факторов является частью деятельности по стандартизации оборонной продукции. Поэтому проблемы нормативного обеспечения испытаний частично обусловлены имеющимися проблемами в области стандартизации оборонной продукции.

К таким проблемам можно отнести:

- неэффективное информационное обеспечение документами по стандартизации оборонной продукции органов военного управления и научно-исследовательских учреждений Минобороны;
- низкий научно-технический уровень разработки нормативно-технических документов (НТД) системы общих технических требований (ОТТ);
- не завершено формирование электронных версий действующей НТД системы ОТТ;
- наличие значительного количества устаревших НТД системы ОТТ и невысокие темпы их обновления. Это обусловлено высокой трудоёмкостью процедур разработки НТД системы ОТТ. Имеют место многочисленные несогласованные между собой требования в различных документах, в том числе в терминологии.

Законодательные акты и регламентирующие документы, направленные на решение проблем стандартизации оборонной продукции

Для решения назревших в области стандартизации оборонной продукции проблем и формирования правовых основ стандартизации в течение последних трех лет был разработан ряд законодательных актов и регламентирующих документов.

Основные из этих документов.

1. В 2016 г. был принят Федеральный закон РФ «О стандартизации» от 29 июня 2016 г., № 162-ФЗ.

2. В соответствии с частью 1 статьи 6 Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» Правительство Российской Федерации Постановлением от 30 декабря 2016 г. №1567 утвердило «Положение о порядке стандартизации в отношении оборонной продукции (товаров, ра-

бот, услуг) по государственному оборонному заказу, а также процессов и иных объектов стандартизации, связанных с такой продукцией».

Функции головной организации Министерства обороны РФ по стандартизации оборонной продукции в части системы общих технических требований к видам ВВТ возложены на ФБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России.

В соответствии с «Положением о порядке стандартизации...» (Постановление Правительства от 30 декабря 2016 г. №1567) полномочия в области стандартизации оборонной продукции в Министерстве обороны реализует Главное управление ВС РФ (управление технического регулирования) путем координации работ федеральных органов исполнительной власти, органов военного управления, научно-исследовательских организаций Министерства обороны и создания Информационного центра стандартизации оборонной продукции.

Выводы

На основе рассмотрения проблем научно-методического обеспечения испытаний ВВТ на действие электромагнитных факторов и перспектив развития испытательного комплекса 12 ЦНИИ можно сделать следующие выводы.

В настоящее время технические возможности экспериментально-испытательной базы позволяют проводить испытания широкой номенклатуры образцов ВВТ на соответствие требованиям стойкости и безопасности к воздействию ЭМИ ЯВ и полей источников естественного и искусственного происхождения. При этом в рамках ГОЗ проводится планомерная модернизация экспериментальной базы, в результате которой к 2025 году будут существенно увеличены ее возможности.

В области задания и подтверждения требований стойкости основные проблемы связаны с координацией работ по разработке нормативно-технических документов, развитием методов физико-математического моделирования взаимодействия ЭМФ с объектами.

Недостаточны темпы обновления НТД, регламентирующих требования и методы испытаний, недостаточен уровень гармонизации документов.

Перспективные направления работы по обеспечению испытаний включают совершенствование нормативных документов, разработку методик испытаний, развитие расчетно-экспериментальных методов оценки стойкости и безопасности образцов ВВТ, устойчивости оборудования и аппаратуры объектов инфраструктуры.

Список литературы

1. IEC 61000-2-9 (1996), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-9: Environment – Description of HEMP environment – Radiated disturbance.
2. IEC 61000-2-10 (1998), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
3. IEC 61000-2-11 (1999), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
4. IEC 61000-4-25 (2001), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.
5. IEC/TR 61000-4-32 (2002), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-32: Testing and measurement techniques – High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.
6. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – №4(51). – С. 5–17.
7. Executive Order 13865 of March 26, 2019. Coordinating National Resilience to Electromagnetic Pulses. Federal Register, Vol. 84, No. 61, March 29, 2019.
8. Давыдов А. А., Кондратьева А. И., Плыгач В. А. Задание исходных данных в расчете взаимодействия электромагнитных полей с объектами. – Сборник докладов IX российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности, ЭМС-2006. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 305–309.
9. Ядерный оружейный комплекс, т.14. – М.: Оружие и технологии, 2007. – С. 400–412.
10. Бурутин А.Г., Перцев С.Ф., Балюк Н.В. Экспериментально-испытательная база Минобороны России. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №1(32). – С. 33–37.

11. Физика ядерного взрыва. Том 3. Воспроизведение факторов взрыва. – М.: Физматлит, 2013. – 472 с.
12. Балюк Н.В., Давыдов А.А., Крохалев Д.И., Орлов С.Д. Расчетно-экспериментальные методы оценки соответствия технических средств заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – №2 (65). – С. 7–21.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Авторы

Балюк Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б; balyknwwa@mail.ru.

Перцев Сергей Федорович, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Орлов Сергей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России по научно-испытательной работе; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Balyuk N.V., Pertsev S.F., Orlov S.D.

Environmental electromagnetic factors and methodological support for testing samples of armaments and military engineering

Abstract. Problem questions of testing samples of armaments and military engineering for conformity to requirements of immunity and safety in modern conditions are considered. The basic directions of activity in the given area are: improvement of test base; updating of normative base; development of methodological support for tests.

Capabilities of test means allow to carry out tests of the wide nomenclature of armaments to action of electromagnetic factors. Modernization of experimental base is performed within the bounds of the State Defensive Order.

In the field of updating normative base, the basic problems are connected with coordination of works on development of standards. The rates of updating of the normative documents, which regulate the requirements and test methods, are low; the level of harmonization of documents is insufficient.

The appearance of new test equipment and new standards causes necessity of development of testing techniques. In addition, the progress of methodological support, including experiment-calculated techniques for evaluation of electromagnetic immunity and safety of armaments and military engineering, allows to expand capabilities of the test equipment and to improve quality of the tests.

Key words: tests of objects, immunity, test base, normative documents

References

1. IEC 61000-2-9 (1996). Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-9: Environment – Description of HEMP environment – Radiated disturbance.
2. IEC 61000-2-10 (1998). Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
3. IEC 61000-2-11 (1999). Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
4. IEC 61000-4-25 (2001). Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.

5. IEC/TR 61000-4-32 (2002). Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-32: Testing and measurement techniques – High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.
6. Kechiev L.N., Balyuk N.V. The requirements of foreign standards on immunity and safety of objects to high-power electromagnetic effects. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2014, no. 4 (51), pp. 5–17. (in Russian)
7. Executive Order 13865 of March 26, 2019. Coordinating National Resilience to Electromagnetic Pulses. Federal Register, Vol. 84, No. 61, March 29, 2019.
8. Davydov A.A., Kondrat'eva A.I., Plygach V.A. Zadanie iskhodnykh dannykh v raschete vzaimodeystviya elektromagnitnykh poley s ob'ektami [Initial data definition in calculation of interaction of electromagnetic fields with objects]. *Sbornik dokladov IX Rossiyskoy NTK po EMS [Proc. of IX Russian Conf. on EMC]*. St. Petersburg, 2006, pp. 305–309. (in Russian)
9. *Yadernyy orujeynyy kompleks, tom 14* [Nuclear weapon complex, vol. 14]. Moscow, Orujie i Tekhnologii Publ., 1973, pp. 400–412. (In Russian)
10. Balyuk N.V., Burutin A.G., Pertsev S.F. Experimentally-test base of the Ministry of Defence of Russia. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no. 1 (32), pp. 33–37. (in Russian)
11. *Fizika yadernogo vzryva. Tom 3. Vosproizvedenie faktorov vzryva* [Physics of nuclear explosion. Volume 3. Reproduction of factors of explosion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 472 p. (in Russian)
12. Balyuk N.V., Davydov A.A., Krokhaliev D.I., Orlov S.D. Computational-Experimental Methods for Evaluation of Electronic Equipment Agreement to Specified Requirements of Electromagnetic Immunity and Safety. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2 (65), pp. 7–21. (in Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Authors

Balyuk Nikolay V., doctor of engineering science, professor, chief scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation; e-mail: balyknwwa@mail.ru.

Pertsev Sergey F., Honoured Scientist of RF, doctor of engineering science, professor, chief scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Orlov Sergey D., candidate of engineering science, associate professor, assistant chief of the institute in scientific-test activity, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

УДК 621.316

**Ю.Н. Бармаков, В.И. Бутин, П.Я. Кундышев, Т.Г. Сысоева,
Ю.А. Руденко, Д.А. Тузков**

Резонансные явления при взаимодействии высокочастотных электромагнитных полей с аппаратурой в электропроводящих корпусах

В данной статье приведены результаты анализа резонансных процессов, наблюдаемых в экранирующих оболочках, с акцентом на волновой режим экранирования. Сформулированы актуальные направления дальнейших исследований степени влияния резонансных процессов на вновь разрабатываемую аппаратуру. Это, в первую очередь, дифференциация и ранжирование резонансных частот корпуса, на которых наблюдается максимальная реакция в чувствительных блоках аппаратуры. Во-вторых, это детальная экспериментальная и теоретическая проработка последствий воздействия на составные части аппаратуры модулированных высокочастотных сигналов на резонансных частотах оболочек. В-третьих, это качественная и количественная оценка влияния пространственной ориентации воздействующего ЭМП относительно рассматриваемой оболочки.

Ключевые слова: эффективность экранирования, наведенный ток, корпус, электропроводящая оболочка, резонансная частота, волновой режим

Введение

В процессе проектирования и разработки современной аппаратуры, содержащей высокопроизводительные, узкоспециализированные приборы и составные части, которые работают на все более высоких рабочих частотах, одним из первостепенных по важности аспектов является учет требований по ЭМС [1–3]. Одним из первых звеньев в цепочке обеспечения ЭМС аппаратуры является создание качественной конструкции аппаратуры, способной эффективно экранировать чувствительные блоки аппаратуры как от всех электромагнитных помех и полей, действующих извне, так и не допускать распространения излучаемых в процессе работы аппаратуры излучений во внешнюю среду [4]. До 1980–1990 гг. рабочие частоты аппаратуры составляли, в основном, единицы-десятки мегагерц, а рабочий диапазон источников мощных электромагнитных помех, которые могли потенциально воздействовать на эту аппаратуру, не превосходил единиц ГГц. С точки зрения практики экранирования не требовалось обеспечивать тщательную экранировку корпусов аппаратуры для защиты от переизлучений через всевозможные неоднородности корпуса (вентиляционные отверстия, щели в стыках сопрягающихся частей, отверстия под соединители и пр.). С электродинамической точки зрения это обуславливалось работой корпуса как экрана в квазистационарном режиме, т.е. имел место случай, когда геометрические размеры корпуса были много меньше длин волн воздействующего ЭМП. Эффективность экранирования с ростом частоты в этом режиме, как правило, возрастала [5].

Однако, к настоящему времени переход рабочих частот аппаратуры в гигагерцовую область обуславливает потенциальную уязвимость аппаратуры от внешних электромагнитных воздействий и требует более детального подхода к проектированию конструкции: необходимо уменьшать проникновение ЭМП через указанные всевозможные апертуры в корпусе аппаратуры [6]. Как размеры корпуса, так и неоднородностей в нем, являются электрически длинными по отношению к длинам волн воздействующего высокочастотного ЭМП. При этом проводящий корпус переходит в волновой режим, при котором его экранирующая способность приобретает резонансный характер, что может негативно сказаться на работоспособности чувствительных блоков аппаратуры [7].

Резонансные явления проявляются, в первую очередь, в том, что пространственное распределение ЭМП внутри экранирующей конструкции трансформируется таким образом, что формируются устойчивые области с выраженным градиентом напряженностей ЭМП, что характерно для электромагнитного резонатора, работающего на собственном виде мод (колебаний). Отличие заключается

только в источнике возбуждения. Так, в классическом электромагнитном резонаторе колебания могут быть созданы источниками типа штыря, петли либо узкой щели в резонаторе, к которым подводится электромагнитная энергия извне. А в корпусе – это проводные соединения, заходящие во внутреннюю область корпуса и всевозможные неоднородности в корпусе, которые вследствие воздействия внешних ЭМП становятся вторичными антеннами, излучающими ЭМП во внутреннее пространство [8].

В этой связи представляет практический интерес определить основные направления работ по обеспечению электромагнитной защищенности в волновом режиме для вновь разрабатываемой аппаратуры.

В данной статье представлен в обобщенном виде анализ результатов исследований, посвященных резонансным процессам, происходящим в экранирующих оболочках. Представлены основные результаты ранее проведенных исследований эффективности экранирования электропроводящих оболочек и наводок в проводных соединениях внутри данных оболочек с акцентом на волновой режим экранирования. Кроме того, представлены направления исследований, на которые, по мнению авторов, необходимо обращать внимание при оценке уязвимости вновь разрабатываемой аппаратуры.

Анализ результатов исследований, выполненных различными авторами

а) Эффективность экранирования корпуса

В первую очередь, исследования экранирующей способности корпусов проводились преимущественно для отработки расчетных методик оценки степени проникновения ЭМП высокочастотного диапазона сквозь оболочки аппаратуры типовых форм. Большинство авторов за основу используют результаты классических работ, проведенных группами исследователей под руководством Robinson и др. [9], а также Thomas и др. [10]. В данных работах впервые экспериментально продемонстрировано резкое снижение эффективности экранирования по магнитной и электрической компонентам напряженностей ЭМП для прямоугольного металлического корпуса с одним и несколькими прямоугольными отверстиями. Авторы исследовали как экранирующую способность полых корпусов, так и корпусов с наполнением из плат, металлических отсеков, а также новых материалов, поглощающих энергию ЭМП внутри корпуса. Во всех случаях результаты показывали снижение эффективности экранирования конструкции в диапазоне от 100 МГц до 1–2 ГГц. Авторы также предложили использовать достаточно простой метод эквивалентных схем замещения для расчета ЭМП, прошедшего во внутреннее пространство корпуса.

Большинство современных исследователей используют в своих работах результаты упомянутых экспериментальных исследований для отработки собственных расчетных методик оценки эффективности экранирования конструкций экранов прямоугольной формы. Как правило, в наибольшей мере развиваются различные модификации конечно-разностных методов (FDTD), методов моментов (МоМ), гибридных методов и др. [например, 11–14]. В результате, разработанные методы позволяют решать узкоспециализированные задачи, например, прохождение ЭМП через корпус с отверстиями сложных форм и множеством отверстий. Отдельной задачей современные исследователи считают снижение времени, необходимого для проведения расчетов. В этой связи, приобретает значение создание методов, позволяющих с минимальными упрощениями и достаточной степенью детализации получить результаты по определению эффективности экранирования конструкции за приемлемое время.

Кроме того, развиваются методы эквивалентных схем, при которых система «воздействующее ЭМП – экранирующий корпус – внутреннее ЭМП» с электродинамической точки зрения заменяется эквивалентной электрической схемой, параметры которой позволяют рассчитать характеристики прошедшего во внутреннее пространство ЭМП [15, 16]. Преимущество данных методов заключается в относительно небольшом времени, требуемом для расчета.

Отдельно необходимо выделить получение аналитических соотношений автором Solin [17, 18]. Несмотря на свою «громоздкость», разработанные формулы позволяют оценивать экранирующую способность как для электрически коротких, так и для электрически длинных неоднородностей на корпусе типа щелей и отверстий.

Углубление знаний о процессах, происходящих в экранирующих оболочках при реализации облучения на резонансных частотах, привело к необходимости выделения специальных подходов к проведению испытаний и исследований конструкций аппаратуры, что отражено в стандартах [19, 20]. Так, в [20] приведена методика проведения типовых испытаний экранирующих конструкций с

наибольшими габаритами от 0,1 до 2 м в диапазоне от 9 кГц до 18 ГГц, причем основной упор сделан преимущественно на методологию испытаний электрически больших (длинных) конструкций по отношению к воздействующим длинам волн ЭМП. При этом наряду с типовыми испытаниями объектов по определению экранирующих свойств конструкций в безэховой камере рекомендовано также проводить работы в реверберационной камере. В последнем случае используется одна излучающая и одна-две приемных антенны. Оценку эффективности экранирования целесообразно проводить по отношению мощностей, которые зарегистрированы приемными антеннами в камере вне исследуемого объекта и внутри него.

Кроме того, в ряде учебных пособий и научных статей при рассмотрении терминологии эффективности экранирования преимущественно в высокочастотном диапазоне ряд исследователей предлагает наряду с определением эффективности экранирования по напряженности, мощности и энергии от одной рассматриваемой точки внутри корпуса переходить к т.н. глобальной эффективности экранирования, которая могла бы учитывать вклад напряженностей поля во всех точках пространства интегрально [21–23]. При этом можно было бы избавиться от проблемы, когда оказывается пропущенной область пространства внутри корпуса, где потенциально могут образоваться повышенные уровни ЭМП, что может негативно сказаться на помехозащищенности чувствительных узлов аппаратуры.

б) Наведенные токи в проводных соединениях, размещаемых внутри корпуса

Знание эффективности экранирования конструкции при воздействии ЭМП в заданной частотном диапазоне, безусловно, является самостоятельной задачей, позволяющей в процессе проектирования схемно-конструктивного облика аппаратуры выбирать необходимые методы по обеспечению достаточного уровня для практически всех основных показателей межсистемной ЭМС. Однако, с точки зрения оценки реакции аппаратуры на внешнее электромагнитное воздействие в высокочастотном диапазоне самоцелью может являться определение токов и напряжений, наведенных в проводных соединениях, которые подходят к чувствительным блокам аппаратуры, а также энергии (мощности), которая может выделиться в компонентах из приборного состава данной аппаратуры. При реализации воздействия ЭМП в волновом режиме экранирования это приобретает первостепенное значение, поскольку именно на резонансных частотах наблюдается повышенное проникновение ЭМП внутрь корпуса.

Рядом ученых были проведены исследования наводок, образующихся в проводных соединениях, при облучении экранирующей конструкции ЭМП на резонансных частотах. В результате, было продемонстрировано, что вблизи резонансных частот корпуса наведенные токи в проводных соединениях также испытывают скачок, как и в случае с эффективностью экранирования [24, 25]. Уровни наводок в резонансной области превосходили минимум на порядок аналогичные значения, полученные в нерезонансной области.

Авторами данной работы также были проведены сравнительные исследования влияния распределения ЭМП внутри корпуса и наведенных токов в нагрузках наиболее часто встречающихся в практике неэкранированных проводных соединений при заполнении корпуса конструктивными компонентами [26, 27]. Было установлено, что при увеличении степени заполнения внутреннего объема корпуса конструкционными материалами происходит сдвиг резонансных частот, на которых снижается эффективность экранирования, в область более низких частот. Кроме того, была установлена зависимость наведенных токов в неэкранированных проводных линиях связи, размещенных внутри экранирующих корпусов, от типа линий, направления облучения и резонансных частот корпуса. В результате исследований выявлено, что амплитудно-частотная зависимость токов наводки для всех размещенных внутри корпуса типов линий повторяет форму ЭМП, образующегося внутри корпуса в непосредственной близости от линий, а в первую очередь – резонансных максимумов ЭМП в полосе частот, в которой корпус переходит в волновой режим экранирования. Вне зависимости от типа проводного соединения при одной конкретной ориентации ЭМП на определенных резонансных частотах корпуса в нагрузках любой линии будет индуцироваться максимально возможный ток. Ток наводки в нагрузках отдельно взятой линии в случае варьирования ориентаций ЭМП будет примерно сопоставим друг с другом на резонансных частотах корпуса.

в) Разработка и исследование защитных свойств новых материалов

Использование полностью металлического корпуса как электромагнитного экрана имеет ряд особенностей, которые могут ограничивать его применение в ряде практических приложений. Одной из основных является относительно высокие массогабаритные показатели. Применение электропроводящих композитных, пластмассовых, пленочных, тканых, ленточных, сеточных и пр. материалов, из которых может быть изготовлена конструкция корпуса или его составные части, приводит к значительному снижению массы и размеров защитного экрана [4, 6]. С точки зрения оценки экранирующих свойств для резонансного облучения оболочек, включающих в свой состав вышеуказанные материалы, анализ показывает, что они ведут себя аналогично типовым полностью металлическим экранам [28, 29]. Небольшие количественные отличия заключаются в возможности менять и контролировать в процессе производства способность разных слоев данных материалов поглощать и отражать ЭМП. Это также может изменять эффективность экранирования всей конструкции, в т.ч. на резонансных частотах. Таким образом, зная зависимость эффективности экранирования от толщины слоев определенного специализированного материала, в принципе, можно оценивать уровни ЭМП, воздействующие на блоки и приборы чувствительной аппаратуры и при реализации резонансных воздействий.

Перспективные направления исследований

Рассмотрим перспективные направления в области исследований воздействия ЭМП на экранирующие конструкции в волновом режиме экранирования.

а) Исследование и определение мод (колебаний) корпуса как резонатора, на которых наблюдается максимальная реакция в чувствительных блоках аппаратуры

Анализ результатов экспериментов указывает, что минимальные значения эффективности экранирования корпусов могут наблюдаться не только на первых резонансных частотах корпуса, которые соответствуют основным модам резонатора [30–32]. С ростом частоты как электрическая, так и магнитная компоненты напряженности ЭМП, регистрируемые внутри корпуса, могут также расти. Однако, для классического идеального электромагнитного резонатора переход на моды (колебания) более высокого порядка, как правило, приводит к снижению его добротности. Отсюда, можно ожидать, что будет происходить снижение регистрируемых напряженностей ЭМП.

Возможным объяснением может считаться дополнительное влияние, вносимое неоднородностями в корпусе как щелевыми антеннами. При этом с ростом частоты щелевые антенны способны более эффективно возбуждать ЭМП внутри корпуса [33], что и может служить причиной возрастания уровней зарегистрированных значений напряженностей ЭМП и, следовательно, снижения эффективности экранирования конструкции.

При этом, необходимо отметить, что детальная проработка и выявление наиболее «проблемных» резонансных частот, на которых возможно возникновение максимальных уровней ЭМП, обуславливает необходимость дальнейших исследований.

б) Исследование воздействия модулированных сигналов на резонансных частотах

Резонансные процессы, возникающие при совпадении частот внешнего возбуждающего ЭМП с собственными частотами оболочки аппаратуры как резонатора, могут привести к значительному локальному возрастанию напряженности ЭМП внутри корпуса РЭА. Частотный диапазон потенциальной уязвимости аппаратуры при размерах корпуса до одного метра находится в пределах от 300 МГц и выше. При отсутствии модуляции большинство приборов, блоков и ЭКБ аппаратуры функционируют на характерных рабочих частотах до единиц-десятков МГц и указанные резонансные явления не оказывают прямого электрического влияния на работоспособность аппаратуры. Низкочастотная модуляция воздействующего радиочастотного излучения (например, воздействие АМ-излучения) может существенно изменить ситуацию. В случае, если высокочастотное модулирующее колебание передается на частоте, соответствующей собственной резонансной частоте корпуса аппаратуры, то модулирующий низкочастотный сигнал, проникая под корпус, может представлять потенциальную опасность для функционирования составных частей, поскольку его частота может попасть в диапазон рабочих частот аппаратуры (единицы-десятки МГц) [34].

Моделирование воздействия АМ-излучения на функциональные элементы экранированной аппаратуры является сложной задачей и требует обращения преимущественно к численным методам, которые реализованы в современных программных продуктах. Авторами проведено исследование

прохождения АМ-излучения внутрь экранирующей оболочки с типовой неоднородностью (типа узкой щели) с определением степени проникновения прошедшего поля, а также оценкой наведенных токов в нагрузках проводных линий. Результаты исследований показывают, что при воздействии на электропроводящую оболочку АМ-излучения прошедшее внутрь корпуса ЭМП сравнимо с воздействием на оболочку. Выявлено также, что наведенный ток в проводных линиях, расположенных внутри корпуса, в несколько раз превышает наведенный ток в проводных линиях, непосредственно подвергающихся облучению (корпус отсутствует).

Дальнейшие исследования сбоеустойчивости приборов и ЭКБ при кондуктивном воздействии по интерфейсным входам амплитудно-модулированных сигналов указывает, что с определенных воздействующих частот (как модулирующего, так и модулируемого сигналов) штатная работа схем может быть нарушена. В этой связи, представляется перспективным проведение дальнейших работ по исследованию восприимчивости различных узлов аппаратуры при воздействии модулированных сигналов.

в) Исследование влияния пространственной ориентации векторов ЭМП относительно корпуса (в т.ч. исследование различной поляризации сигналов).

Практически все исследования по определению реакции аппаратуры в экранированном исполнении проводились для линейной поляризации воздействующего ЭМП (например, [21, 35]). Эффекты, способные возникнуть при реализации круговой или эллиптической поляризациях, на наш взгляд, практически не рассмотрены. Данные эффекты могут проявляться в том, что знание экранирующей способности и реакции чувствительных узлов аппаратуры в нескольких взаимно перпендикулярных положениях при линейной поляризации воздействующего высокочастотного ЭМП может быть не в полной мере информативно.

Например, в типовом случае, при облучении аппаратуры, на корпусе которой присутствует единственная узкая прямоугольная щель, для получения максимальной степени её возбуждения как щелевой антенны, необходимо создание условий для наибольшей эффективной (действующей) длины антенны, что возможно при ориентации вектора напряженности электрической составляющей ЭМП строго перпендикулярно к наибольшему размеру щелевой антенны, т.е. ее узкой части [36]. При испытаниях и исследованиях реальной аппаратуры, корпус которой насыщен всевозможными неоднородностями (под соединители, вентиляцию, порты ввода-вывода, смотровые люки, технологические отверстия и пр.) практически невозможно разместить корпус так, чтобы все неоднородности типа рассматриваемых щелей были строго перпендикулярно векторам ЭМП и, следовательно, обуславливали максимальную реакцию на резонансных частотах. Тогда для создания максимальной реакции целесообразно облучать изделие ЭМП с круговой либо эллиптической поляризациями. При этом максимальная эффективность воздействия будет в любом случае достигнута, поскольку за один период колебаний каждый из векторов воздействующего ЭМП сможет создать максимальное взаимодействие с каждой из неоднородностей. В этой связи, целесообразно проведение дальнейших исследований по определению конкретной реакции корпусированной аппаратуры на воздействие высокочастотных ЭМП с различной поляризацией сигналов.

В заключении данного раздела необходимо высказать известный практический тезис, справедливость которого в полной мере можно отнести и к проблеме резонансных явлений. Он заключается в том, что в правильно спроектированном экране, применении типовых схемно-конструктивных мероприятий по обеспечению ЭМС, реакция аппаратуры на воздействие внешних ЭМП, в т.ч. проявляющихся через резонансные явления, может быть эффективно снижена до приемлемых уровней [37]. При этом, основной задачей инженера-проектировщика следует считать умение решать сложную задачу обеспечения помехозащищенности аппаратуры, используя доступные современные методы и подходы к конструированию аппаратуры и входящих в ее состав блоков с учетом возможности возникновения в аппаратуре упомянутых явлений.

Выводы

В данной работе выполнен анализ опубликованных к настоящему времени результатов исследований, посвященных резонансным процессам, происходящим в экранирующих оболочках. Представлены основные направления проводимых работ в области определения эффективности экранирования электропроводящих оболочек, наводок в проводных соединениях внутри данных оболочек с акцентом на волновой режим экранирования. Сформулированы перспективные направления исследований, на которые целесообразно обратить первостепенное внимание при разработке современной

аппаратуры. Это, в первую очередь, дифференциация и ранжирование резонансных частот корпуса, на которых наблюдается максимальная реакция в чувствительных блоках аппаратуры. Во-вторых, это детальная экспериментальная и теоретическая проработка воздействия на аппаратуру модулированных сигналов на резонансных частотах проводящих оболочек. В-третьих, это качественная и количественная оценка влияния пространственной ориентации воздействующего ЭМП относительно рассматриваемой оболочки.

Список литературы

1. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: Издательский дом «Технологии», 2004. – 540 с.
2. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – М.: Грифон, 2017. – 424 с.
3. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. Монография. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
4. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2010. – 470 с.
5. Гроднев И.И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. – М.: Связь, 1972. – 110 с.
6. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие / Л.Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2019. – 720 с.
7. Кундышев П.Я., Бутин В.И. Эффективность экранирования металлических корпусов РЭА в СВЧ-диапазоне при волновом режиме электромагнитного воздействия. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. – №4 (43). – С. 7–17.
8. Бутин В.И., Кундышев П.Я. Количественная оценка энергии высокочастотного излучения, проникающего внутрь корпуса РЭА, в начале резонансного режима экранирования. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – №2 (61). – С. 3–14.
9. Robinson M.P. et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. – IEEE Trans. on EMC. – 1998. Vol. EMC-40. №3. – P. 240–248.
10. Thomas D.W.P. et al. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. – IEEE Trans. on EMC. – 2001. Vol. EMC-43. № 2. – P. 161–169.
11. Yan L. et al. Efficient Shielding Effectiveness Prediction of Metallic Structures With Three-Dimensional Arbitrary Thin Slots Using Extended CP-FDTD. – IEEE Trans. on EMC. – 2019. Vol. EMC-61. № 4. – P. 1353–1361.
12. Ataeian H., Dehkhoda P. Fast Time-Domain Analysis of a Metallic Enclosure With Arbitrary-Shaped Apertures by Marching-on-in-Degree. – IEEE Trans. on EMC. – 2018. Vol. EMC-60. № 3. – P. 638–646.
13. Mohammadi E. et al. Shielding Effectiveness Analysis of Large Enclosures by Domain Decomposition Mesh-Free Method. – IEEE Trans. on EMC. – 2017. Vol. EMC-59. № 5. – P. 1441–1448.
14. Maftooli H. et al. An Efficient Time-Domain Integral Solution for a Loaded Rectangular Metallic Enclosure With Apertures. – IEEE Trans. on EMC. – 2016. Vol. EMC-58. № 4. – P. 1064–1071.
15. Shourvarzi A., Joodaki M. Shielding Effectiveness Measurement for Extremely Small Dimension Enclosures. – IEEE Trans. on EMC. – 2019. Vol. EMC-61. № 6. – P. 1740–1745.
16. Yin M., Du P. An Improved Circuit Model for the Prediction of the Shielding Effectiveness and Resonances of an Enclosure with Apertures. – IEEE Trans. on EMC. – 2016. Vol. EMC-58. № 2. – P. 448–456.
17. Solin J.R. Formula for the Field Excited in a Rectangular Cavity with an Aperture and Lossy Walls. – IEEE Trans. on EMC. – 2015. Vol. EMC-57. № 2. – P. 203–209.
18. Solin J.R. Formula for the field excited in a cavity sealed with a plate backed by a conductive elastomer. – IEEE Trans. on EMC. – 2016. Vol. EMC-58. № 1. – P. 111–116.
19. IEEE Std 299-2006. IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. 39 p.
20. IEEE Std 299.1-2013. IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. 84 p.

21. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic shielding. – John Wiley and Sons, Inc. IEEE Press: Hoboken, New Jersey, 2008. – 358 p.
22. Araneo L. et al. Time-Domain Shielding Performance of Enclosures: A Comparison of Different Global Approaches. – IEEE Trans. on EMC. – 2016. Vol. EMC-58. № 2. – P. 434–441.
23. Klinkenbusch L. On the shielding effectiveness of enclosures. – IEEE Trans. on EMC. – 2005. Vol. EMC-47. № 3. – P. 589–601.
24. Solin J.R. Formula for the Shielding Effectiveness of a Rectangular Cavity with a Penetrating Cable. – IEEE Trans. on EMC. – 2016. Vol. EMC-58. № 4. – P. 1060–1063.
25. Rabat A. et al. Analytical Models for Electromagnetic Coupling of an Open Metallic Shield Containing a Loaded Wire. – IEEE Trans. on EMC. – 2017. Vol. EMC-59. № 5. – P. 1634–1637.
26. Бутин В.И., Кундышев П.Я., Сысоева Т.Г., Филатов М.М. Влияние снижения экранирующей способности оболочки при волновом режиме в СВЧ-диапазоне электромагнитного воздействия на реакцию проводной линии, размещенной внутри оболочки. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – №1/2(48). – С. 16–20.
27. Butin V., Kundyshev P. Study of Currents Induced in Wire Lines Placed inside the Metal Shield of Electronics in the Beginning of the Resonance Mode / 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Seoul, Korea, 2017. – P.172–174.
28. Mojtaba M., Sadeghi S., Dehmollaian M. Efficient method for calculating the shielding effectiveness of axisymmetric multilayered composite enclosures. – IEEE Trans. on EMC. – 2020. Vol. EMC-62. № 1. – P. 218–228.
29. Rybicki T. EMI Shielding and Reflection from Textile Mesh Grids Compared With Analytic Models. – IEEE Trans. on EMC. – 2019. Vol. EMC-61. № 2. – P. 372–380.
30. Jarva W. Shielding tests for cables and small enclosures in the 1- to 10-GHz range. – IEEE Trans. on EMC. – 1970. Vol. EMC-12. № 1. – P. 12–24.
31. Flintoft I.D. et al. Representative Contents Design for Shielding Enclosure Qualification From 2 to 20 GHz. – IEEE Trans. on EMC. – 2018. Vol. EMC-60. № 1. – P. 173–181.
32. SureshKumar T.R. et al. Transmission line approach to calculate the shielding effectiveness of an enclosure with double-layer frequency selective surface. – IEEE Trans. on EMC. – 2018. Vol. EMC-60. №1. – P. 173-181.
33. Honig E.M. Electromagnetic shielding effectiveness of steel sheets with partly welded seams. – IEEE Trans. on EMC. – 1977. Vol. EMC-19. № 4. – P. 377–382.
34. Бутин В.И., Кундышев П.Я., Сысоева Т.Г. Расчетная оценка величин токов, наведенных в нагрузках проводных линий внутри металлических экранов, при воздействии радиочастотных амплитудно-модулированных сигналов. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 4(67). – С. 64–70.
35. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование: Научное издание / Д.Н. Шапиро. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. – 120 с.
36. Надененко С.И. Антенны. – М.: Связьиздат, 1959. – 551 с.
37. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 478 с.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»), 127055, Россия, Москва, ул. Суцневская, 22, тел.: (499) 978-78-03; vniiia@vniiia.ru.

Авторы

Бармаков Юрий Николаевич, д.т.н., проф., первый заместитель научного руководителя ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; Российская Федерация, Москва, 142055, ул. Суцневская, 22. Тел. (499) 978-13-79, e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Бутин Валентин Иванович, д.т.н., проф., начальник научно-исследовательского отделения ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; Российская Федерация, Москва, 142055, ул. Суцневская, 22. Тел. (499) 978-90-85; e-mail: butinvi@yandex.ru.

Кундышев Павел Ярославович, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; Российская Федерация, Москва, 142055, ул. Суцневская, 22. Тел. (499) 972-84-99, доб. 17-81; e-mail: enniofilm@mail.ru.

Сысоева Татьяна Григорьевна, старший научный сотрудник, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; Российская Федерация, Москва, 142055, ул. Сушевская, 22. Тел. (499) 972-84-99, доб. 71-30; e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Руденко Юрий Алексеевич, научный сотрудник, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; Российская Федерация, Москва, 142055, ул. Сушевская, 22. Тел. (499) 972-84-99, доб. 71-27; e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Тузков Дмитрий Александрович, инженер, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; Российская Федерация, Москва, 142055, ул. Сушевская, 22. Тел. (499) 972-84-99, доб. 17-81; e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Barmakov Y.N., Butin V.I., Kundyshev P.Ya., Sysoeva T.G., Rudenko Y.A., Tuzkov D.A.

Resonance Phenomena in Interaction of Microwaves with Devices equipped with Conducting Shield

Abstract. In this paper resonances in shielded enclosures especially in the wave regime of shielding are analyzed. The current areas for the further investigations related to resonance effect on modern equipment are stated. The first area contains the eigen resonance frequencies selection and ranking depending on the maximum reaction on susceptible components. The second area lies in experimental and theoretical works subjected to microwave signals interaction with the components placed inside the enclosure when modulated by the shield resonance frequencies. The qualitative and quantitative assessment of the effect caused by the direction of microwave incidence on the shield to be the third area.

Key words: shielding effectiveness, induced current, housing, conducting enclosure, resonance frequency, wave regime.

References

1. Williams T. *EMS dlja razrabotchikov produkcii* [EMC for product designers]. Moscow, Izdatel'skij dom «Tekhnologii», 2003. 540 p. (In Russian).
2. Kechiev L.N. *Pечатные платы I uzly gigabitnoj jelectroniki* [Printed circuit boards and gigabit electronics' components]. Moscow, Grifon, 2017. 424 p. (In Russian).
3. Kechiev L.N. *Proektirovanye печатных плат dlja cifrovoj bystrodejstvujushej apparatury* [PCB design for hi-speed digital electronics. Monography]. Moscow, ООО "Gruppa IDT", 2007. 616 p. (In Russian).
4. Kechiev L.N., Akbashev B.B., Stepanov P.V. *Ekranirovanie tekhnicheskikh sredstv i ekraniruiushchie sistemy* [Shielding of technical equipment and shielding systems]. Moscow, Gruppa IDT, 2010. 470 p. (In Russian).
5. Grodnev I.I. *Electromagnitnoe ekranirovanie v shirokom diapazone chastot* [Electromagnetic shielding in wide frequency range]. Moscow, Svjaz', 1972. 110 p. (In Russian).
6. Kechiev L.N. *Ekranirovanie radiojelektronnoj apparatury. Inzhenernoe posobie* [Shielding of electronics. Textbook for engineers]. Moscow, Grifon, 2019. 720 p. (In Russian).
7. Butin V.I., Kundyshev P.Y. Shielding effectiveness of radio electronics' metallic enclosure in microwave region in wave regime of electromagnetic impact. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2012, no. 4 (43), pp. 7–17 (in Russian).
8. Butin V.I., Kundyshev P.Y. On energy transmitted inside the electronics housing under external microwave radiation in the beginning of the resonance mode of shielding. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2017, no. 2 (61), pp. 3–14 (in Russian).
9. Robinson M.P. et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Trans. on EMC*. 1998. Vol. EMC-40. №3. P. 240-248.
10. Thomas D.W.P. et al. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. *IEEE Trans. on EMC*. 2001. Vol. EMC-43. № 2. P. 161–169.
11. Yan L. et al. Efficient Shielding Effectiveness Prediction of Metallic Structures With Three-Dimensional Arbitrary Thin Slots Using Extended CP-FDTD. *IEEE Trans. on EMC*. 2019. Vol. EMC-61. №4. P. 1353–1361.

12. Ataeian H., Dehkhoda P. Fast Time-Domain Analysis of a Metallic Enclosure with Arbitrary-Shaped Apertures by Marching-on-in-Degree. *IEEE Trans. on EMC*. 2018. Vol. EMC-60. №3. P. 638-646.
13. Mohammadi E. et al. Shielding Effectiveness Analysis of Large Enclosures by Domain Decomposition Mesh-Free Method. *IEEE Trans. on EMC*. 2017. Vol. EMC-59. № 5. P. 1441–1448.
14. Maftooli H. et al. An Efficient Time-Domain Integral Solution for a Loaded Rectangular Metallic Enclosure With Apertures. *IEEE Trans. on EMC*. 2016. Vol. EMC-58. № 4. P. 1064–1071.
15. Shourvarzi A., Joodaki M. Shielding Effectiveness Measurement for Extremely Small Dimension Enclosures. *IEEE Trans. on EMC*. 2019. Vol. EMC-61. № 6. P. 1740–1745.
16. Yin M., Du P. An Improved Circuit Model for the Prediction of the Shielding Effectiveness and Resonances of an Enclosure with Apertures. *IEEE Trans. on EMC*. 2016. Vol. EMC-58. № 2. P. 448–456.
17. Solin J.R. Formula for the Field Excited in a Rectangular Cavity with an Aperture and Lossy Walls. *IEEE Trans. on EMC*. 2015. Vol. EMC-57. № 2. P. 203–209.
18. Solin J.R. Formula for the field excited in a cavity sealed with a plate backed by a conductive elastomer. *IEEE Trans. on EMC*. 2016. Vol. EMC-58. №1. P. 111-116.
19. IEEE Std 299-2006. IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. 39 p.
20. IEEE Std 299.1-2013. IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. 84 p.
21. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic shielding. John Wiley and Sons, Inc. IEEE Press: Hoboken, New Jersey, 2008. 358 p.
22. Araneo L. et al. Time-Domain Shielding Performance of Enclosures: A Comparison of Different Global Approaches. *IEEE Trans. on EMC*. 2016. Vol. EMC-58. №2. P. 434-441.
23. Klinkenbusch L. On the shielding effectiveness of enclosures. *IEEE Trans. on EMC*. 2005. Vol. EMC-47. № 3. P. 589–601.
24. Solin J.R. Formula for the Shielding Effectiveness of a Rectangular Cavity With a Penetrating Cable. *IEEE Trans. on EMC*. 2016. Vol. EMC-58. № 4. P. 1060–1063.
25. Rabat A. et al. Analytical Models for Electromagnetic Coupling of an Open Metallic Shield Containing a Loaded Wire. *IEEE Trans. on EMC*. 2017. Vol. EMC-59. № 5. P. 1634–1637.
26. Butin V.I., Kundyshev P.Y., Sysoeva T.G., Filatov M.M. Effect of the shielding effectiveness decreasing of the enclosure in wave regime in microwaves on the reaction of the inner-placed wire line. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2014, no. 1/2 (48), pp. 16–20. (In Russian).
27. Butin V., Kundyshev P. Study of Currents Induced in Wire Lines Placed inside the Metal Shield of Electronics in the Beginning of the Resonance Mode. *2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Seoul, Korea, 2017. pp.172–174.
28. Mojtaba M., Sadeghi S., Dehmollaian M. Efficient method for calculating the shielding effectiveness of axisymmetric multilayered composite enclosures. *IEEE Trans. on EMC*. 2020. Vol. EMC-62. № 1. P. 218–228.
29. Rybicki T. EMI Shielding and Reflection from Textile Mesh Grids Compared with Analytic Models. *IEEE Trans. on EMC*. 2019. Vol. EMC-61. №-2. P. 372–380.
30. Jarva W. Shielding tests for cables and small enclosures in the 1- to 10-GHz range. *IEEE Trans. on EMC*. 1970. Vol. EMC-12. №1. P. 12-24.
31. Flintoft I.D. et al. Representative Contents Design for Shielding Enclosure Qualification from 2 to 20 GHz. *IEEE Trans. on EMC*. 2018. Vol. EMC-60. № 1. P. 173–181.
32. SureshKumar T.R. et al. Transmission line approach to calculate the shielding effectiveness of an enclosure with double-layer frequency selective surface. *IEEE Trans. on EMC*. 2018. Vol. EMC-60. № 1. P. 173–181.
33. Honig E.M. Electromagnetic shielding effectiveness of steel sheets with partly welded seams. *IEEE Trans. on EMC*. 1977. Vol. EMC-19. № 4. P. 377–382.
34. Butin V.I., Kundyshev P.Y., Sysoeva T.G. Calculation of currents induced in wires located within shielding box under amplitude modulated electromagnetic radiation. *Tekhnologii elektromagnitnoi*

- sovmestimosti – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2018, no. 4 (67), pp. 64–70. (In Russian).
35. Shapiro D.N., *Electromagnitnoe ekranirovanie: naychnoe izdanie* [Electromagnetic shielding: Scientific issue]. Dolgoprudnyj: Izdatel'skij dom "Intellekt", 2010. 120 p.
 36. Nadenenko S.I., *Antenny* [Antennas]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po voprosam svyazi i radio, 1959. 551 p.
 37. Baliuk N.V., Kechiev L.N., Stepanov P.V. *Moshchnyi elektromagnitnyi impul's: vozdeistvie na elektronnye sredstva i metody zashchity* [High power electromagnetic pulse: the impact on electronics and the protection techniques]. Moscow: Gruppya IDT, 2007. 478 p.

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), ul. Sushchevskaya, 22, 127055 Moscow, Russian Federation, tel. 8(499) 978-78-03, vniiia@vniiia.ru.

Authors

Barmakov Yuri Nikolaevich, first deputy scientific director, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), tel. 8(499) 978-13-79, e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Butin Valentin Ivanovich, research department director, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), tel. 8(499) 978-90-85, e-mail: butinvi@yandex.ru.

Kundyshev Pavel Yaroslavovich, head of research division, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), tel. 8(499) 978-84-99, add. 17-81, e-mail: enniofilm@mail.ru.

Sysoeva Tatiana Grigor'evna, head researcher, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), tel. 8(499) 972-84-99, add. 71-30, e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Rudenko Yuri Alekseevich, researcher, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), tel. 8(499) 972-84-99, add. 71-27, e-mail: vniiia@vniiia.ru.

Tuzkov Dmitri Aleksandrovich, engineer, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), tel. 8(499) 978-84-99, add. 17-81, e-mail: vniiia@vniiia.ru.

УДК 537.868

**Н.В. Балюк, А.А. Давыдов, Д.И. Крохалев,
Д.А. Малофеев, С.Д. Орлов**

Методология подтверждения соответствия образцов вооружения и военной техники заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности

В статье рассматривается методология подтверждения соответствия образцов вооружения и военной техники требованиям электромагнитной стойкости и безопасности. Вопросы подтверждения соответствия образцов вооружения заданным требованиям рассмотрены в контексте более общей проблемы обеспечения стойкости на всех этапах их жизненного цикла и во взаимосвязи с другими направлениями деятельности в данной области. Для снижения затрат при разработке и модернизации образцов вооружения и сокращения сроков разработки целесообразно оценку их стойкости к воздействию электромагнитных факторов проводить с использованием всех имеющихся данных по уровням помехоустойчивости используемой аппаратуры (систем, устройств, электронных компонентов). При задании требований по стойкости к электромагнитным факторам для аппаратуры следует использовать значения запаса стойкости, определяемые путем инженерной оценки с учетом степени критичности данной аппаратуры для безопасности образца вооружения или выполнения задач по предназначению. Подтверждение соответствия образца заданным требованиям стойкости осуществляется на завершающем этапе его разработки путем испытаний образца на установках-имитаторах электромагнитных факторов. Применение комплексного подхода к обеспечению электромагнитной стойкости и безопасности образцов вооружения, последовательно проводимого на всех этапах их разработки, повышает точность и достоверность получаемых при испытаниях результатов.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, электромагнитная стойкость, помехоустойчивость, метод расчета, метод испытаний

1. Актуальность проблемы обеспечения стойкости образцов вооружения в условиях воздействия внешних электромагнитных факторов

Одним из основных требований к образцам вооружения и военной техники (ВВТ) является обеспечение их стойкости и безопасности в условиях воздействия внешних электромагнитных факторов (ЭМФ). Проблема обеспечения электромагнитной стойкости образцов ВВТ не нова, ею занимаются уже давно, как в нашей стране, так и за рубежом. Однако она по-прежнему остается актуальной, что обусловлено следующими тенденциями развития технических средств в целом и образцов вооружения в частности:

- проводится глубокая модернизация образцов ВВТ, при которой расширяются их возможности, усложняется радиоэлектронная аппаратура (РЭА), увеличивается количество выполняемых системами объектов операций;
- все больше функций (в том числе важных, влияющих на выполнение боевой задачи) осуществляется с привлечением микроэлектроники, оборудования информационных технологий, средств связи и вычислительной техники;
- при разработке образцов ВВТ в их конструкции все чаще используются композитные материалы;

- происходит дальнейшая миниатюризация компонентной базы, что приводит к снижению уровней рабочих напряжений и критических уровней токов и энергий, при которых возможны сбои в работе и повреждения элементов радиоэлектронной аппаратуры;
- при разработке образцов вооружения часто используются коммерческие электронные компоненты и элементы аппаратуры;
- появляются и совершенствуются средства преднамеренного электромагнитного воздействия, чья мощность возрастает.
- обеспечение электромагнитной стойкости объектов включает в себя ряд направлений деятельности, к которым относятся:
- описание электромагнитной обстановки (ЭМО), в которой находятся образцы ВВТ;
- разработка методов и средств электромагнитной защиты, их применение при создании конкретных образцов вооружения;
- разработка расчетных методов и методик для оценки помехоустойчивости объектов и эффективности применяемых средств электромагнитной защиты, а также для проведения исследований по созданию средств формирования испытательной ЭМО;
- проведение исследований по оценке помехоустойчивости аппаратуры и систем, обеспечение необходимой степени электромагнитной защищенности аппаратуры на всех этапах разработки образца ВВТ;
- разработка методов и средств формирования испытательных воздействий;
- разработка методологии подтверждения соответствия образцов ВВТ заданным требованиям электромагнитной стойкости, проведение испытаний с целью подтверждения стойкости;
- контроль и обеспечение электромагнитной защищенности и стойкости в течение периода эксплуатации образца ВВТ.

Испытания с целью подтверждения стойкости образцов ВВТ к действию ЭМФ проводятся в 12 ЦНИИ, где создана для этого экспериментально-испытательная база (ЭИБ) [1–3], которая постоянно развивается и совершенствуется.

Следует отметить, что развитие и совершенствование экспериментально-испытательной базы ЭМФ, как и всей системы подтверждения соответствия образцов вооружения заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности, необходимо осуществлять в контексте проблемы обеспечения стойкости ВВТ в целом. В настоящей работе вопросы подтверждения соответствия требованиям стойкости рассмотрены в их взаимосвязи с другими направлениями деятельности в данной области.

2. Описание электромагнитной обстановки образцов ВВТ

Электромагнитная обстановка, в которой функционируют современные технические средства (ТС), очень сложна и разнообразна. Ее источниками являются как естественные (природные) процессы, так и технические или производственные процессы, относящиеся к деятельности человека. Для целей обеспечения работ по разработке стойких к электромагнитным воздействиям образцов ВВТ эта сложная ЭМО, представляющая собой суперпозицию различных электромагнитных факторов, классифицирована и стандартизована в ряде отечественных, зарубежных и международных нормативных документов (НД), к которым в первую очередь следует отнести стандарты МЭК серии 61000 и национальные стандарты на их основе. Чтобы отличать от реальной ЭМО, описанные в НД электромагнитные факторы относят к испытательной или стандартизованной электромагнитной обстановке.

Основные НД, регламентирующие методы оценки и подтверждения требований электромагнитной совместимости (ЭМС), помехоустойчивости и электромагнитной стойкости технических средств, относят к внешним ЭМФ следующие виды воздействий:

- электромагнитный импульс (ЭМИ) высотного ядерного взрыва (ЯВ);
- поля от высоковольтных линий передачи в рабочем режиме и при коротком замыкании;
- поля от контактной сети железных дорог;
- поля станций безобмоточного размагничивания кораблей;
- электромагнитные поля (ЭМП) и токи молниевых разрядов;
- поля излучений радиотехнических средств (РТС);

- электростатические разряды;
- сверхширокополосный ЭМИ;
- сверхвысокочастотное излучение;
- электромагнитные поля электрооборудования авиационных и корабельных комплексов.

Для иностранных образцов вооружения (комплексов, платформ) внешняя испытательная ЭМО описана, например, в стандарте [4, 5]. Типизированы и описаны также электромагнитные поля и токи, воздействующие на аппаратуру в составе образцов вооружения, обусловленные внешней ЭМО, в которой находятся эти образцы. Испытательные воздействия для аппаратуры военного назначения приведены в стандартах [6, 7]. Отечественные военные стандарты ограничиваются описанием внешних ЭМФ, оставляя оценку «внутренней» ЭМО, необходимой для предварительной оценки стойкости аппаратуры, в компетенции разработчика аппаратуры.

Следует отметить, что часть электромагнитной обстановки, которой образец ВВТ подвергается в процессе эксплуатации, остается неизменной (природного происхождения), часть – меняется вследствие развития технических средств (в первую очередь, средств радиосвязи и радиолокации), часть – целенаправленно ужесточается (средства преднамеренного электромагнитного воздействия). Однако, даже для факторов природного происхождения возможно уточнение стандартизованных воздействий в соответствии с современным описанием физических процессов и новыми экспериментальными данными. Таким образом, деятельность по направлению описания электромагнитной обстановки нельзя считать завершенной. Это, в свою очередь, является одним из моментов, обуславливающих необходимость проведения исследований по разработке методов и средств электромагнитной защиты, методов и средств формирования испытательных воздействий, методов испытаний образцов ВВТ на действие ЭМФ.

3. Методы и средства электромагнитной защиты

Методы и средства электромагнитной защиты в настоящее время достаточно хорошо разработаны, имеется обширная литература в данной области. В странах НАТО методы электромагнитной защиты включены в практику разработки образцов вооружения на уровне стандартов и руководств [8, 9].

Для повышения помехоустойчивости аппаратуры образцов ВВТ могут быть применены следующие методы: конструкционный, схемотехнический и структурно-функциональный [10].

Конструкционный метод защиты аппаратуры от воздействия ЭМФ заключается в уменьшении собранной и переданной энергии электромагнитного поля путем улучшения конструкции, размещения и монтажа аппаратуры. К данному методу относятся следующие технические решения:

- исключение из состава аппаратуры интерфейсов, наиболее чувствительных к действию ЭМП интерфейсов (USB, GPIB, COM), использование интерфейсов, в качестве линии связи которых используется витая пара (например, Ethernet), обладающих наименьшей восприимчивостью к действию ЭМП;
- минимизация длины кабельных линий;
- прокладка кабельных линий с минимальным количеством изгибов (необходимо учитывать, что образование колец из кабеля при его прокладке недопустимо);
- дополнительное экранирование кабельных линий и аппаратуры;
- минимизация количества кабельных линий с отводами (наибольшей защитой от действия ЭМП обладает кабель в неразрывном экране, у которого отсутствуют отводы к другой аппаратуре);
- использование волоконно-оптических линий связи;
- использование между блоками аппаратуры кабелей питания в которых жилы сплетены в витую пару, минимизация питания блоков аппаратуры образца ВВТ по схеме «общий корпус»;
- разделение низкочастотных и высокочастотных электрических цепей между блоками аппаратуры в отдельные кабели;
- дополнительное экранирование кабин агрегатов, частично выполненных из радиопрозрачных материалов, использование композитных экранирующих материалов и специальных защитных стекол.

В настоящее время промышленностью выпускается большая номенклатура материалов для дополнительного экранирования корпусов различного оборудования и автомобилей. Например, для нанесения на прозрачные поверхности может использоваться электропроводящая пленка, применимая в диапазоне частот от 15 кГц до 18 ГГц и выше. Материал такой пленки может также использоваться для обогрева стекла при подводе к нему источника тока. Также применяются специальные стекла с проводящим слоем.

Необходимо учитывать, что экранирующие материалы, как правило, слабо поглощают энергию электромагнитной волны. Некачественное экранирование может привести к тому, что электромагнитное поле от внешнего источника при проникновении во внутренний объем может создать больший негативный эффект, чем при отсутствии экранирования. Для поглощения энергии электромагнитных волн производятся специальные материалы. К ним, например, относятся материалы на основе графита. При производстве данного вида поглощающего материала слой графита наносят на поверхность базового материала, добиваясь поверхностного сопротивления единицы – десятки Ом на сантиметр. Падающая электромагнитная волна возбуждает в таком материале поверхностные токи, энергия которых из-за значительного по сравнению с металлами сопротивления преобразуется в тепло. Эффективность радиопоглощающих материалов зависит от их площади и пространственной геометрии.

В настоящее время также выпускаются краски, которые при высыхании образуют покрытие с радиопоглощающими свойствами. Для уменьшения негативного влияния внешних гармонических электромагнитных полей на аппаратуру образцов ВВТ также целесообразно размещать элементы из радиопоглощающего покрытия, в том числе в их внутренних отсеках.

Схемотехнический метод защиты ВВТ от действия ЭМП заключается в уменьшении собранной и переданной энергии электромагнитного поля путем использования защитных устройств. Наибольшее распространение при реализации данного метода получили фильтры на основе ферромагнитных материалов. Также для реализации данного метода в настоящее время применяют высокочастотные керамические фильтры.

Структурно-функциональный метод защиты ВВТ от действия ЭМП заключается в назначении функций, выполняемых аппаратурой, при ее проектировании с учетом восприимчивости данной аппаратуры к действию ЭМП. К данному методу относятся следующие организационные и технические решения:

- повышение рабочих напряжений цифровых интерфейсов передачи данных;
- использование промежуточных блоков для усиления или аналогово-цифрового преобразования информации, поступающей с различных датчиков;
- использование лазерных средств и систем инициирования (задействование таких средств осуществляется при помощи лазерного импульса, передаваемого по оптоволокну).

Следующим этапом после применения средств электромагнитной защиты является оценка их эффективности. Такая оценка в процессе разработки блока аппаратуры, системы или образца может проводиться неоднократно. Создание помехоустойчивого образца вооружения или устройства является результатом компромисса между повышением электромагнитной защищенности, эксплуатационными (боевыми) характеристиками и стоимостью.

4. Оценка помехоустойчивости аппаратуры и систем, обеспечение электромагнитной защищенности аппаратуры на всех этапах разработки образца ВВТ

На этапе разработки отдельных устройств (блоков аппаратуры, оборудования) их помехоустойчивость может быть оценена расчетным путем с использованием имеющихся экспериментальных данных и информации по элементному составу и конструктивному выполнению этих устройств. В процессе разработки эта информация дополняется и уточняется, что позволяет провести более точную оценку помехоустойчивости.

Отправной точкой при оценке помехозащищенности служат уровни рабочих напряжений и данные по электрической и энергетической прочности электронных компонентов (или, по крайней мере, на наиболее критичных из них).

Основными и наиболее уязвимыми электронными компонентами современной аппаратуры являются интегральные микросхемы (ИМС) [11–14]. Это связано, в частности, с уменьшением входных и выходных напряжений ИМС до величин порядка 1 В [12, 14]. Микросхемы в составе РЭА рас-

полагаются на печатных платах, на которых имеются токоведущие линии разных длин и большое количество других элементов. Наведенные на кабельные линии, дорожки печатных плат токи могут приводить к неправильному срабатыванию микросхем, распространению ложной информации, сбоям в работе аппаратуры. При этом наиболее интенсивные наводки обусловлены резонансами проводящих структур. Критичные частоты при воздействии ЭМП на микросхемы в составе печатных плат РЭА составляют от сотен мегагерц до десятков гигагерц [12]. Сами ИМС могут иметь различные размеры, функциональные характеристики и конструктивное исполнение (в частности, могут иметь пластиковый или металлический корпус), что также может оказывать влияние на их восприимчивость в зависимости от частоты.

Данные по критическим уровням энергии для различных типов электронных компонентов имеются, например, в [15, 16].

Для расчета токов на дорожках печатных плат и напряжений на контактах элементов электрических схем при определенных уровнях полей, воздействующих на платы, и напряжений на их входных разъемах могут использоваться имеющиеся вычислительные программы для схем с сосредоточенными параметрами. Сравнение полученных величин с критическими уровнями электронных компонентов (при заданных уровнях внешних воздействий на аппаратуру) дает необходимое ослабление экраном (корпусом) разрабатываемого устройства и оплетками подключенных кабельных линий. Если это не реализуемо, могут потребоваться изменения в конструкции или дополнительные меры защиты. Таким образом, разработка устройства, устойчивого к воздействию электромагнитных помех, представляет собой итерационный процесс, в котором неоднократно оценивается помехозащищенность, и выбираются оптимальные способы электромагнитной защиты. В этом процессе могут также использоваться имеющиеся экспериментальные данные, полученные для аналогичных устройств, экранов, кабелей и т.п.

Конечным этапом разработки устройства являются его испытания, в том числе на электромагнитную стойкость. Методы испытаний аппаратуры на стойкость описаны в стандартах МЭК и национальных стандартах для ТС гражданского назначения [17, 18]. В иностранных военных стандартах [6, 7] приведены стандартизованные воздействия, требования стойкости и описания методов испытаний для аппаратуры и систем военного назначения. Отечественные НД, регламентирующие требования стойкости и методы испытаний аппаратуры военного назначения, описывают только внешнюю электромагнитную обстановку. Вследствие этого, разработчики аппаратуры не имеют однозначных ориентиров относительно требований к ее стойкости, если эти требования не установлены разработчиком конкретного образца ВВТ, и вынуждены полагаться на себя. С другой стороны, разработчик образца вооружения может испытывать аналогичные трудности при выборе аппаратуры для разрабатываемого объекта. Кроме указанных неудобств, такая ситуация может стать причиной возникновения спорных моментов, если возникают проблемы при приемочных испытаниях образца ВВТ.

На этапе разработки образца ВВТ его стойкость первоначально также оценивается расчетным путем. При этом отправной точкой служат уровни помехоустойчивости или данные о стойкости входящих в состав разрабатываемого образца устройств и систем, определенные в ходе испытаний этих устройств и систем. При оценке стойкости используется также информация по конструктивному выполнению образца ВВТ, которая может уточняться в процессе его разработки с целью достижения требуемой стойкости к внешним ЭМФ.

Окончательно подтверждение стойкости образца ВВТ осуществляется в ходе его сдаточных испытаний. При подготовке и проведении испытаний может (и должна) использоваться вся ранее полученная информация по оценке стойкости (помехоустойчивости) испытываемого объекта, его систем и аппаратуры.

На этапах разработки устройств и образца ВВТ в целом применяется концепция электромагнитных барьеров, предложенная К. Баумом и используемая в стандартах международного электротехнического комитета, военных стандартах США и НАТО. Электромагнитный барьер, реализуемый через корпуса объекта и блоков аппаратуры, а также защитные устройства в точках подключения к ним кабельных линий, предназначен для снижения внешних электромагнитных воздействий до уровней, допустимых для используемых в разрабатываемом образце или блоке аппаратуры элементов (устройств, схем, электронных компонентов).

С концепцией электромагнитных барьеров связано понятие запаса стойкости (помехоустойчивости) – разницы между уровнем электромагнитной стойкости подсистемы или оборудования и нормой

испытательного воздействия для системы. Использование данного понятия при задании требований к системам, подсистемам и аппаратуре, в процессе разработки и оценки стойкости образцов ВВТ является одним из важных методических положений зарубежных военных стандартов. Запас стойкости позволяет гибко учитывать изменение конструкции испытываемой системы, связанной с технологией ее изготовления, и влияние выбранного метода испытаний. Конкретное значение запаса стойкости определяется путем инженерной оценки в зависимости от типа конструкции объекта и воздействующей электромагнитной обстановки. Например, в соответствии с MIL-STD-464С [4] для систем военного назначения величина запаса стойкости в большинстве случаев составляет от 6 до 20 дБ. Для оборудования, не критичного для безопасности или выполнения задач по предназначению, может быть использовано минимальное значение запаса стойкости. Для элементов системы, безотказная работа которых является критичной для безопасности и выполнения задач по функциональному назначению образца ВВТ, запас стойкости (прочности) по отношению к норме испытательного воздействия не может быть меньше 6 дБ. Электрические средства инициирования, влияющие на безопасность образца, должны иметь запас прочности не менее 16,5 дБ.

В отечественной практике задания и подтверждения требований по электромагнитной стойкости образцов ВВТ аналогичный подход используется при испытаниях на взрывобезопасность путем установления безопасного уровня тока для электровзрывных устройств.

Таким образом, оценка стойкости создаваемого или модернизируемого образца ВВТ должна полагаться на данные, полученные в процессе его разработки. При этом процесс создания помехоустойчивого образца вооружения или отдельного устройства (системы, подсистемы), в ходе которого выбираются оптимальные способы электромагнитной защиты, является итерационным. Полученный результат основывается на компромиссе между уровнем электромагнитной защищенности и эксплуатационными характеристиками, с учетом разумных затрат на реализацию мер повышения электромагнитной стойкости создаваемого объекта.

Завершающим этапом разработки образца ВВТ являются его сдаточные испытания, в ходе которых осуществляется подтверждение его стойкости к воздействию электромагнитных факторов. Использование при разработке методик испытаний и при проведении испытаний информации, полученной при оценке помехоустойчивости образца, его систем и аппаратуры, позволяет осуществить обоснованный выбор испытательных воздействий, ускорить процесс испытаний, повысить точность и достоверность результатов испытаний.

5. Методы расчета, используемые при оценке стойкости (помехоустойчивости) объектов и обосновании адекватности методов испытаний

Оценка стойкости (помехоустойчивости) разрабатываемых образцов ВВТ или его составных частей может проводиться с использованием экспериментальных и расчетных методов. Выбор метода расчета зависит от особенностей решаемой задачи. В качестве примера расчетно-теоретических задач можно назвать следующие:

- оценка токов, наводимых при воздействии ЭМП на корпуса объектов испытаний;
- оценка токов, наводимых при воздействии ЭМП на кабельные линии стационарных пунктов управления и линии связи, соединяющие агрегаты подвижных ракетных комплексов;
- оценка напряжений на входах антенно-фидерных устройств при воздействии ЭМП.

Кроме того, численные методы могут использоваться при расчете ЭМП, формируемых установками-имитаторами, оценке электромагнитной обстановки, исследованиях, проводимых с целью оценки адекватности нагружения или определения параметров нагружения при применении косвенных методов испытаний, а также с целью установления запаса стойкости для определенных классов вооружения.

При оценке токов, наводимых электромагнитным полем на корпуса объектов испытаний, вычислении формируемых имитаторами ЭМП и решении некоторых других задач необходимо использование полноволновых методов расчета. Существует три основных класса полноволновых методов:

- методы на основе интегральных уравнений, к которым относится метод моментов (Method of Moments – MoM) [19];
- методы, основанные на конечно-разностном решении уравнений Максвелла, из которых наиболее часто используется метод FDTD (Finite Difference Time Domain Method) [20];
- методы конечных элементов, чаще всего в вариационной постановке.

Метод конечных элементов и FDTD относятся к прямым методам решения граничных задач. Они позволяют анализировать практически любую структуру, но требуют больших затрат компьютерных ресурсов и значительного вычислительного времени. Причина этого обусловлена необходимостью дискретизации расчетного пространства. Количество элементов разбиения определяет размерность решаемой задачи, и в прямых методах оно является максимально возможным из всех известных методов.

В методе моментов, относящемся к непрямым методам, расчет основывается на аналитическом решении задачи о возбуждении структуры элементарным источником тока (функциях Грина). МоМ оказывается эффективным, если функции Грина могут быть записаны аналитически в простой форме. В этом случае дискретизации подвергается уже не расчетное пространство, а лишь поверхность структуры, что сильно снижает размерность задачи.

Для электрически больших объектов наряду с полноволновыми методами используют асимптотические (приближенные) методов, например, метод физической оптики. С использованием физической оптики могут решаться такие задачи как расчет формируемых антеннами ЭМП или оценка результатов воздействия поля на объект испытаний с учетом влияния электрически больших проводящих предметов (например, металлического подстилающего покрытия). В области высоких частот могут использоваться также такие асимптотические методы как метод геометрической оптики, геометрической теории дифракции и однородной теории дифракции.

Кроме полноволновых и асимптотических методов, позволяющих моделировать взаимодействие ЭМП с корпусами образцов ВВТ и элементами внутреннего заполнения (перегородками, блоками аппаратуры), для оценки токов в критических цепях объекта испытаний необходимо использование методов, основанных на теории линий передачи с распределенными параметрами, поскольку моделирование кабельных линий полноволновыми методами неэффективно. В качестве основы таких методов, как правило, используется математический аппарат теории MTL (Multiconductor Transmission Line) [21, 22].

Для проведения исследований по оценке токов, наведенных электромагнитным полем в корпусах и кабельных линиях объектов испытаний, разработке испытательного оборудования и оценке адекватности нагружения при испытаниях в 12 ЦНИИ создан ряд расчетных методик, в том числе на основе метода моментов, метода FDTD и метода MTL [23]. Эти методики используются как для проведения самостоятельных исследований, так и для тестирования расчетных моделей, использующих коммерческие программы вычислительной электродинамики, такие как FEKO, CST Microwave Studio, ANSYS / Ansoft, EMA3D и др. Численные методики на основе полноволновых методов могут использоваться также для расчета токов, наводимых на дорожки печатных плат, с целью оценки достижимого уровня помехоустойчивости элементов аппаратуры. Такой анализ возможен, если имеются экспериментальные данные по уровням стойкости электронных компонентов, входящих в состав аппаратуры. При этом для оценки воздействия на электрические схемы относительно низкочастотных импульсных и гармонических сигналов могут использоваться также методы расчета для схем с сосредоточенными параметрами, реализованные в таких программных продуктах как PSPICE и др.

Таким образом, в настоящее время имеются расчетные методики и программы для проведения исследований по предварительной оценке уровней наведенных помех в проводниках разрабатываемых образцов ВВТ и помехоустойчивости блоков аппаратуры. Расчетные методы используются также при разработке средств испытаний, необходимых для воспроизведения электромагнитных воздействий с заданными в нормативных документах параметрами.

6. Воспроизведение параметров воздействия электромагнитных полей на объекты при экспериментальных исследованиях по оценке соответствия образцов ВВТ требованиям электромагнитной стойкости

При подтверждении соответствия разработанных образцов ВВТ заданным требованиям стойкости к воздействию ЭМФ используются, как правило, экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы. При этом применяются установки-имитаторы, воспроизводящие испытательную ЭМО (стандартизованные формы внешних воздействующих электромагнитных полей, токов).

При оценке стойкости на действие ЭМП предпочтительным методом испытаний является прямой метод, когда объект непосредственно подвергается воздействию поля с характеристиками,

близкими к заданным. При применении прямого метода испытаний сохраняются основные электромагнитные связи объекта испытаний с окружающей средой, и наиболее полно моделируются физические процессы, протекающие в случае реального воздействия.

Для получения достоверных результатов при испытаниях на стойкость многие стандарты предписывают подвергать воздействию ЭМП испытываемый объект в целом. Для этого должны соблюдаться следующие условия:

- распределение ЭМП в рабочем объеме имитатора должно соответствовать требуемой структуре поля;
- расположение исследуемого объекта относительно воздействующего поля имитатора должно обеспечивать идентичность его реакции при воздействии воспроизводимых и реальных полей;
- электромагнитные связи с окружающей средой должны соответствовать реальным;
- параметры воспроизводимых полей должны соответствовать требованиям стойкости, изложенным в нормативных документах;
- при облучении электромагнитными полями аппаратура и оборудование объекта должны функционировать в штатных режимах.

В случае использования прямого метода испытаний на действие ЭМП и соблюдения данных условий принято говорить, что оценка соответствия образца требованиям электромагнитной стойкости осуществляется экспериментальным методом. Если эти условия нарушаются или выполняются не в полной мере, то изменяется процесс взаимодействия поля, генерируемого имитатором, с объектом. В этих случаях, в зависимости от полноты учета факторов и условий при воспроизведении полей, используются различные расчетно-экспериментальные методы оценки соответствия требованиям стойкости.

Необходимость применения расчетно-экспериментальных методов испытаний в значительной степени обусловлена ограниченными возможностями существующей экспериментально-испытательной базы по воспроизведению испытательных ЭМП. Одним из наиболее распространенных случаев, когда необходимо применение расчетно-экспериментальных методов, являются испытания крупногабаритных объектов (например, образцов автомобильной или авиационной техники).

Для реализации различных методов испытаний образцов ВВТ на действие электромагнитных полей применяются имитаторы, которые можно условно разделить на три группы: имитаторы связанных волн, имитаторы излучаемых волн, имитаторы наведенных импульсных токов и напряжений. В России наиболее представительной экспериментально-испытательной базой по составу имитаторов и номенклатуре воспроизводимых электромагнитных воздействий в настоящее время является экспериментально-испытательная база 12 ЦНИИ Минобороны России [1–3].

Характеристики имитаторов ЭИБ 12 ЦНИИ позволяют провести испытания на действие электромагнитных факторов значительной номенклатуры ВВТ с использованием прямых (экспериментальных) методов. Однако в ряде случаев, например, при испытаниях крупногабаритных объектов или систем, имеющих протяженные линии связи, необходимо привлечение расчетно-экспериментальных методов. Так, к расчетно-экспериментальным методам оценки стойкости относят так называемые косвенные методы, когда воспроизводятся не сами поля, а результат их воздействия на корпуса, антенны и кабельные линии объектов испытаний в виде наведенных токов и напряжений. При этом параметры испытательных воздействий определяются на основе результатов предварительных расчетных и/или экспериментальных исследований.

Косвенный метод испытаний путем пропускания тока по корпусу (в англоязычной литературе DCI – direct current injection) может быть реализован только для объектов испытаний, корпус которых выполнен из проводящего материала. Испытания проводятся в следующей последовательности.

На первом этапе расчётным (с использованием методов численного моделирования) или расчётно-экспериментальным путем определяют параметры и распределение тока, протекающего по корпусу испытываемого образца при воздействии внешнего ЭМП. В случае расчётно-экспериментального способа определения параметров нагружения испытываемый объект облучается полями на пониженных уровнях, соответствующих предельным техническим возможностям моделирующих установок. При этом измеряют параметры токов в корпусе, которые затем пересчитывают (экстраполируют) на заданные уровни воздействующих ЭМП. Могут также измеряться токи, наведенные в оплетках кабельных линий.

На втором этапе проводят нагружение путем пропускания тока с параметрами, соответствующими воздействию заданного ЭМП. При этом оценивается работоспособность аппаратуры, которая при проведении испытаний должна находиться во включённом состоянии. Контроль правильности нагружения может осуществляться по результатам измерения токов, наведенных в оплетках кабельных линий. К достоинствам метода относится возможность одновременного нагружения всех кабельных линий и систем объекта испытаний воздействием, эквивалентным воздействию полей заданного уровня.

При испытании на действие радиочастотных ЭМП метод инъекции тока в корпус может применяться в диапазоне частот от 1,5 МГц до частоты первого резонанса корпуса испытываемого образца ВВТ (обычно 5–20 МГц). Методом пропускания тока по корпусу возможно также проведение испытаний ВВТ на действие низкочастотных импульсных полей, например, ЭМП молнии.

В том случае, если мощность источника недостаточна для формирования воздействия ЭМП на весь объект, может быть использован также метод инъекции тока в оплетки и жгуты кабельных линий (в англоязычной литературе наиболее часто используется термин BCI – bulk current injection). Метод применяется ко всем соединительным кабелям, включая кабели питания. Для этого на каждый жгут кабельной сети, подключенный к испытываемому оборудованию, устанавливаются инжектор тока и контрольный измерительный датчик тока. Испытательный сигнал последовательно подается на каждую цепь; в ходе нагружения контролируются параметры протекающих по оплетке токов. Параметры инжектируемых токов предварительно определяются на основе результатов расчетных или экспериментальных исследований. При экспериментальном способе параметров инжектируемых токов используют метод нагружения полями пониженного уровня (так называемый метод LLSC – low level swept current). В соответствии с различными НД, в том числе военного стандарта США MIL-STD-461F [6], национальных и международных стандартов по ЭМС [18], стандартов для авиационного оборудования и автомобильной техники [24, 25], метод BCI используется вплоть до частот 80–400 МГц.

Расчетно-экспериментальный метод используется и при оценке взрывобезопасности образцов ВВТ в условиях воздействия гармонических и импульсных ЭМП. Необходимо отметить, что к электрическим цепям, задействующим электровзрывные устройства (ЭВУ), имеющиеся практически во всех образцах вооружения, предъявляются особенно высокие требования по защищенности к воздействию ЭМП. Воспроизведение требуемых уровней поля для полномасштабного облучения крупногабаритных объектов при испытаниях их на взрывобезопасность во многих случаях практически нереализуемо. Поэтому при оценке безопасности эксплуатации также используется метод испытаний на пониженных уровнях с измерением наведенных токов в опасных цепях объектов испытаний и последующим пересчетом на требуемые уровни воздействия. Особенностью таких испытаний является то, что безопасные уровни наведенных токов и энергий являются заранее известными характеристиками ЭВУ. Это позволяет провести оценку безопасности испытываемого образца непосредственно путем сравнения определенных в ходе испытаний значений наведенных токов с безопасными уровнями тока для используемых типов ЭВУ, без дополнительного нагружения корпуса, кабельных линий или отдельных блоков аппаратуры. При этом безопасные уровни тока для ЭВУ задаются с учетом определенного запаса стойкости.

Таким образом, при подтверждении соответствия образцов ВВТ требованиям стойкости к воздействию ЭМФ, что является последним этапом в процессе обеспечения электромагнитной стойкости объектов (не считая контроля стойкости в течение периода эксплуатации) используются экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы, в зависимости от возможностей ЭИБ. Наиболее развитой в настоящее время является экспериментально-испытательная база 12 ЦНИИ Минобороны России, характеристики имитаторов которой позволяют провести испытания образцов ВВТ на действие всех основных электромагнитных факторов.

7. Заключение

В настоящее время значительная часть испытаний с целью подтверждения стойкости образцов ВВТ к действию ЭМФ проводится в 12 ЦНИИ, где создана для этого экспериментально-испытательная база. Вопросы развития и совершенствования системы подтверждения соответствия образцов ВВТ заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности рассмотрены в настоящей статье в общем контексте проблемы обеспечения стойкости образцов вооружения на

всех этапах их жизненного цикла, во взаимосвязи с другими направлениями деятельности в данной области, начиная от описания электромагнитной обстановки и разработки методов и средств электромагнитной защиты до конкретной реализации этих методов на этапе создания образца и проверки их эффективности на этапе его сдаточных испытаний.

Оценка стойкости аппаратуры образца ВВТ осуществляется на разных этапах его разработки. При этом как на этапе разработки отдельных устройств (блоков аппаратуры, оборудования), так и на этапе разработки самого образца (комплекса) вооружения оценка стойкости аппаратуры к воздействию электромагнитных факторов может проводиться с использованием расчетных и/или экспериментальных методов, на основе всех полученных в процессе разработки данных. При задании требований по стойкости для аппаратуры (систем, устройств) и оценке стойкости образцов ВВТ используют значения запаса стойкости, определяемые путем инженерной оценки в зависимости от типа объекта, его конструкции, воздействующей электромагнитной обстановки, степени критичности аппаратуры для безопасности образца вооружения или выполнения задач по предназначению.

Подтверждение соответствия образца заданным требованиям стойкости осуществляется на завершающем этапе его разработки путем испытаний образца на установках-имитаторах ЭМФ с применением экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов. При разработке методик испытаний и при проведении испытаний разрабатываемого или модернизируемого образца ВВТ следует использовать всю имеющуюся информацию, полученную при оценке помехоустойчивости образца, его систем и аппаратуры, что позволит осуществить обоснованный выбор испытательных воздействий, ускорить процесс испытаний, повысить точность и достоверность результатов испытаний.

Список литературы

1. Бурутин А.Г., Перцев С.Ф., Балюк Н.В. Экспериментально-испытательная база Минобороны России. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №1 (32). – С. 33–37.
2. Давыдов А.А., Плыгач В.А., Чибисов Ю.Ф. Электромагнитные факторы природного и техногенного происхождения и способы их воспроизведения при испытаниях объектов вооружения и военной техники. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №1 (32). – С. 38–48.
3. Акиншин И.В., Бзыта В.И., Варюхин Е.Г., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н. Методы и средства испытаний вооружения и военной техники на действие электромагнитных полей радиотехнических средств. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №1 (32). – С. 79–88.
4. MIL-STD-464C. Electromagnetic Environmental Effects. Requirements for Systems. Department of Defense. Interface Standard. 01 December 2010.
5. AEP-41, Volume II. Electromagnetic Environments, Electromagnetic Environmental Effects, and Operational Categories. December 2004.
6. MIL-STD-461F. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. Department of Defense Interface Standard. 10 December 2007.
7. АЕСТР-500. Electrical/Electromagnetic Environmental Tests. Edition 2. Category 501. Equipment and Subsystem Testing. 18 May 2006.
8. AEP-41. Volume V. NATO Implementation of Unified Protection against Electromagnetic Environmental Effects. December 2012.
9. NAVSEA OD 30393. Second Revision. Design Principles and Practices for Controlling Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (HERO Design Guide). 1 April 2001.
10. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
11. Михайлов В.А. Разработка методов и моделей анализа и оценки устойчивого функционирования бортовых цифровых вычислительных комплексов в условиях преднамеренного воздействия сверхкоротких электромагнитных излучений. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – ОАО «Научно-исследовательский институт «Аргон», 2014. – 390 с.
12. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. – Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 8. – Доступно на <http://jre.cplire.ru/win/aug10/3/text.html#9> (доступ 12 марта 2019).

13. Ахрамович Л.Н., Грибский М.П., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старостенко В.В., Чурюмов Г.И. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти. – Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – № 4. – С. 15–17.
14. Ognjen Jović. Susceptibility of ICs to Conducted Electromagnetic Interference. – 6 p. – 2008. – Доступно на <https://www.researchgate.net/publication/> (доступ 3 мая 2019).
15. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
16. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
17. ГОСТ Р 51317.4.3-2006 (МЭК 61000-4-3-2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. – М., Стандартинформ, 2007.
18. ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний. – М., ИПК Издательство стандартов, 2000.
19. Harrington R.F. Field Computation by Moment Method. – New York: McMillan Company, 1968. – 229 с.
20. K. S. Yee. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14 (May 1966). – Pp. 302–307.
21. F. M. Tesche, M. Ianoz, T. Karlsson. EMC Analysis methods and computational models. – New York: Wiley Interscience, 1997. – 623 p.
22. Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines. Edited by F. Rachidi & S.V. Tkachenko. – UK: WIT Press, 2008. – 259 p.
23. Балюк Н.В., Давыдов А.А., Крохалев Д.И., Орлов С.Д. Расчетно-экспериментальные методы оценки соответствия технических средств заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2 (65). – С. 7–21.
24. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. – АРМАК, 2004. – 324 с.
25. ГОСТ ИСО 11452-4-2007. Транспорт дорожный. Методы испытаний компонентов на устойчивость к воздействию узкополосного излучения электромагнитной энергии. Часть 4. Инжекция объемного тока. – Минск, Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации (ЕАСС), 2007.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Авторы

Балюк Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б; balyknwwa@mail.ru.

Давыдов Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Крохалев Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Малофеев Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, член военно-научного комитета 12 Главного управления Минобороны России; Россия, г. Москва.

Орлов Сергей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России по научно-испытательной работе; Российская Федерация, Москов-

ская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Balyuk N.V., Davydov A.A., Krokhalev D.I., Malofeev D.A., Orlov S.D.

The Metodology of Verification of Armaments and Military Engineering to Compliance with the Requirements of Electromagnetic Immunity and Safety

Abstract. In the paper, the methodology of armaments and military engineering verification to compliance with the requirements of electromagnetic immunity and safety is considered. The questions of armaments and military engineering verification to compliance with specified requirements are considered in the context of more general problem of immunity assurance during all stages of their life cycle and in coordination with other activities in this area. To reduce cost and time of development (modernization) of armaments and military engineering it is reasonable to evaluate their immunity to electromagnetic environments using all available data on noise-immunity levels of applied equipment (systems, devices, electronic components). When specifying the requirements of electromagnetic immunity for equipment it is needed to use the values of immunity margins, which are defined by means of engineering evaluation taking into account criticality of this equipment for armament safety or mission. Verification of armaments to compliance with immunity requirements is accomplished during the last stage of their development by means of the tests with the use of simulators of electromagnetic environments. Using on all stages of the armaments development comprehensive approach to assurance of electromagnetic immunity and safety will improve the quality of results obtained in the tests.

Key words: electromagnetic environments, electromagnetic immunity, interference immunity, numerical method, test method

References

1. Burutin A.G., Pertsev S.F., Balyuk N.V. Experimentally-test base of the Ministry of Defence of Russia. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no. 1 (32), pp. 33–37. (In Russian)
2. Davydov A.A., Plygach V.A., Chibisov Yu.F. Electromagnetic Factors of Natural and Technogene Origin and Methods of their Reproduction in Testing Military Object and Equipment. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no. 1 (32), pp. 38–48. (in Russian)
3. Akinshin I.V., Bzyta V.I., Varyukhin E.G., Dubrovin E.A., Krokhalev D.I., Matyukhevich S.N. Test Methods and Facilities for Testing Arms and Military Equipment on Action of Electromagnetic Fields Generated by Radio Transmitter and Radars. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no. 1 (32), pp. 79–88. (in Russian)
4. MIL-STD-464C. Electromagnetic Environmental Effects. Requirements for Systems. Department of Defense. Interface Standard. 01 December 2010.
5. AEP-41, Volume II. Electromagnetic Environments, Electromagnetic Environmental Effects, and Operational Categories. December 2004.
6. MIL-STD-461F. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. Department of Defense Interface Standard. 10 December 2007.
7. AECTP-500. Electrical/Electromagnetic Environmental Tests. Edition 2. Category 501. Equipment and Subsystem Testing. 18 May 2006.
8. AEP-41. Volume V. NATO Implementation of Unified Protection against Electromagnetic Environmental Effects. December 2012.
9. NAVSEA OD 30393. Second Revision. Design Principles and Practices for Controlling Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (HERO Design Guide). 1 April 2001.
10. Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I. Radioelektronnye sredstva i moschnye elektromagnitnye pomekhi. [Radio-Electronic Facilities and High-Power Electromagnetic Environments]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987, 256 p. (In Russian)
11. Mikhaylov V.A. *Razrabotka metodov i modeley analiza i ozenki ustoytschivogo funktsionirovaniya bortovykh zifrovyykh vytschislitel'nykh kompleksov v usloviyakh prednamerennogo vozdeystviya*

- sverkhkorotkikh elektromagnitnykh izlucheniya* [The Development of Methods and Models for Analysis and Assessment of Functioning of On-Board Digital Computational Facilities under Intentional Exposure to Ultra-Short Electromagnetic Radiation. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Sciences]. Moscow, Research Institute Argon Publ., 2014, 390 p. (In Russian)
12. Klyuchnik A.V., Pirogov Yu.A., Solodov A.V. Metodicheskie aspekty issledovaniya stoykosti integral'nykh mikroshem v elektromagnitnykh polyakh impul'snogo radioizlucheniya [Methodic aspects of analysis of immunity of integrated circuits to electromagnetic fields of pulsed radio-wave radiation]. *Jurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2010, no. 8, pp. 22–34. (In Russian). Accessible at <http://jre.cplire.ru/win/aug10/3/text.html#9> (access at March 12, 2019).
 13. Akhramovich L.N., Gribskiy M.P., Grigor'ev E.V., Zuev S.A., Starostenko V.V., Churyumov G.I. Vozdeystvie impul'snykh elektromagnitnykh poley na integral'nye mikroshemy pamyati [Effect of pulsed electromagnetic fields on IC memory chips]. *Radioelektronika i informatika – Radio Electronics & Informatics*, 2006, no. 4, p.p. 15–17. (In Russian)
 14. Ognjen Jović. Susceptibility of ICs to Conducted Electromagnetic Interference. 2008, 6 p. Accessible at <https://www.researchgate.net/publication/> (access at May 3, 2019).
 15. Kravchenko V.I. *Grozozaschita radioelektronnykh sredstv: Spravochnik* [Lightning Protection of Radio-Electronic Facilities: Handbook]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991, 264 p. (In Russian)
 16. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. *Obespechenie stoykosti apparatury svyazi k ioniziruyuschim i elektromagnitnym izlucheniya* [Assurance of Immunity of Communication Equipment to Ionizing and Electromagnetic Radiations]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988, 296 p. (In Russian)
 17. State Standard GOST R 51317.4.3-2006. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity. Requirements and test methods. Moscow, Standartinform Publ., 2007. (In Russian)
 18. State Standard GOST R 51317.4.6-99. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields. Requirements and test methods. Moscow, IPK Izdatel'stvo Standartov Publ., 2000. (In Russian)
 19. Harrington R.F. *Field Computation by Moment Method*. New York, Mc'Millan Company Publ., 1968. 229 p.
 20. K. S. Yee. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, May 1966, pp. 302-307.
 21. F. M. Tesche, M. Ianoz, T. Karlsson, *EMC Analysis methods and computational models*. New York, Wiley Interscience Publ., 1997. 623 p.
 22. *Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines*. Edited by F. Rachidi & S.V. Tkachenko. UK, WIT Press Publ., 2008. 259 p.
 23. Balyuk N.V., Davydov A.A., Krokhaliev D.I., Orlov S.D. Computational-Experimental Methods for Evaluation of Electronic Equipment Agreement to Specified Requirements of Electromagnetic Immunity and Safety. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2 (65), pp. 7–21. (In Russian)
 24. Aviation Standard KT-160D. Qualification requirements QR-160D. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. ARMAK Publ., 2004. 324 p. (In Russian)
 25. Interstate Standard GOST ISO 11452-4-2007. Road Vehicles. Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy. Part 4. Bulk Current Injection (BCI). Minsk, EASS Publ., 2007. (In Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Authors

Balyuk Nikolay V., doctor of engineering science, professor, chief scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation; e-mail: balyknwwa@mail.ru.

Davydov Andrey A., candidate of engineering science, associate professor, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Krokhalev Dmitry I., candidate of engineering science, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Malofeev Dmitry A., candidate of engineering science, member of military-scientific committee, 12 Senior Management of Ministry of Defence of RF (12 GU); 119160 Moscow, Russian Federation.

Orlov Sergey D., candidate of engineering science, associate professor, assistant chief of the institute in scientific-test activity, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

УДК 621.317.328+621.317.31.014.33

**К.Ю. Сахаров, В.А. Туркин, О.В. Михеев, А.В. Сухов,
В.Л. Уголев, М.Ю. Денисов**

Средства измерений импульсных электромагнитных полей и токов

В работе приведен обзор современных средств измерений импульсных электрического и магнитного полей, а также импульсных токов. Данные средства измерений применяются в имитаторах электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения для контроля параметров воздействий при испытаниях. Средства измерений импульсного электрического поля охватывают амплитудный диапазон от 1 В/м до 500 кВ/м (магнитного поля – от 5 мА/м до 5 кА/м) и временной диапазон от единиц пикосекунд до десятков миллисекунд. Средства измерений импульсных токов на основе шунтов и катушек индуктивности предназначены для применения при испытаниях на устойчивость к молниевым и электростатическим разрядам. Такие средства измерений охватывают амплитудный диапазон от 0,1 А до 200 кА и временной диапазон от 1 нс до 1 мс. Рассмотренные измерительные преобразователи внесены в Федеральный информационный фонд средств измерений, обеспечена прослеживаемость к Государственным первичным эталонам.

Ключевые слова: средство измерений, электромагнитный импульс, импульсный ток, молниевый разряд, электростатический разряд, испытания, имитатор

Введение. Вооружение, военная и специальная техника, а также гражданские объекты испытываются на устойчивость к различным видам импульсных электромагнитных воздействий [1, 2]: электромагнитному импульсу ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), электромагнитным полям (ЭМП) высоковольтных линий электропередачи (ВЛЭП) и контактной сети железных дорог (КС ЖД), магнитным полям (МП) станций безобмоточного размагничивания кораблей (СБРК), импульсам тока грозового (ГР) и электростатического разрядов (ЭСР), сверхширокополосному электромагнитному импульсу (СШП ЭМИ).

Экспериментально-испытательные базы включают в себя различные комплексы имитаторов в зависимости от типов и классов испытываемых объектов. Испытания вооружения и военной техники на стойкость к электромагнитным факторам естественного и искусственного происхождения проводятся на экспериментальной базе 12 ЦНИИ Министерства обороны РФ [3]. В Крыловском государственном научном центре эксплуатируется комплекс имитаторов для испытаний морских технических объектов [4, 5]. Объекты электроэнергетики, специальная техника испытываются на экспериментальной базе Высоковольтного научного испытательного центра ВНИИТФ [6]. Испытания молниестойкости авиационной техники проводятся в ЛИИ им. Громова и 23 ГМПИ [7, 8]. Очевидно, что список указанных выше научно-испытательных центров не является исчерпывающим. Например, во многих организациях используются малогабаритные установки для испытаний отдельных блоков и узлов изделий. Необходимость такого развития экспериментально-испытательной базы объясняется не только различием типов и конструкций испытываемых объектов, но и различием стандартов, нормирующих параметры испытательных воздействий.

Достоверность результатов испытаний зависит не только от методик их выполнения, но и от наличия метрологически обеспеченных средств измерений, позволяющих контролировать параметры испытательных воздействий в имитаторах с требуемой точностью. Многообразие стандартов, видов испытаний и имитаторов привело к появлению большой номенклатуры используемых средств измерений импульсных электрических и магнитных величин. Нередко оказывается, что с помощью только одного средства измерений невозможно определить амплитудно-временные параметры воздействия в имитаторе. Например, если воспроизведение воздействия происходит в широком динамиче-

ском диапазоне, или соотношение между длительностью импульса и длительностью его фронта не позволяет определять их одновременно.

Модернизация и развитие экспериментально-испытательной базы невозможны без обновления парка используемых средств измерений. Это обусловлено устареванием средств измерений, появлением новых типов, обладающих большей функциональностью, расширенными амплитудно-временными диапазонами и другими улучшенными техническими характеристиками. В 2006 году второй выпуск журнала «Технологии электромагнитной совместимости» был посвящен излучателям и средствам измерений параметров электромагнитных импульсов, разработанным во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) [9]. К тому моменту средства измерений охватывали амплитудный диапазон до 200 кВ/м (500 А/м), а нижняя граница временного диапазона составляла 40 пс.

За прошедшее время разработаны новые типы измерительных преобразователей напряженности импульсного электрического поля, работающие в диапазоне единиц-десятков пикосекунд [10]. Такие средства измерений применяются при определении характеристик радиопоглощающих материалов, при испытаниях технических средств на устойчивость к преднамеренным электромагнитным воздействиям, в электрофизических установках [11]. Выпущены средства измерений импульсных полей с быстродействующими лазерными волоконно-оптическими линиями связи [12]. Появились новые типы средств измерений импульсных токов, прослеживаемые к утвержденному в 2012 году Государственному первичному эталону единицы импульсного тока молниевых разрядов ГЭТ 202-2012 [12, 13].

Цель настоящей работы – дать обзор современных средств измерений амплитудно-временных параметров импульсных электрического и магнитного полей, а также импульсных токов, выпускаемых ВНИИОФИ. Авторы обращают внимание, что представлена информация о средствах измерений утвержденных типов, внесенных в Федеральный информационный фонд средств измерений. Также следует заметить, что рассмотренные средства измерений предназначены не для измерений параметров импульсных электромагнитных воздействий в натуральных условиях, а для использования в имитаторах, воспроизводящих воздействия со стандартизированными параметрами.

Средства измерений параметров ЭМИ ЯВ. Верхняя граница диапазона амплитуд импульсов напряженности электрического поля в имитаторах ЭМИ ЯВ может составлять 250 кВ/м (магнитного поля – 1300 А/м), длительность фронта от 0,5 до 20 нс, длительность импульсов от единиц наносекунд до десятков миллисекунд [1, 2, 15]. Для измерения параметров электромагнитных импульсов с указанными характеристиками применяют емкостные и индукционные преобразователи с волоконно-оптическими линиями связи, а также измерительные преобразователи на основе полосковой линии.

На рис. 1 показаны емкостной и индукционный преобразователи типов ИП-Е и ИП-Н для измерения амплитудно-временных параметров импульсов электрического и магнитного полей соответственно. Каждый преобразователь состоит из трех основных частей: первичного измерительного преобразователя, волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) и блока фотоприемника. Преобразование импульсов напряженности электрического поля в электрический сигнал осуществляется с помощью емкостной антенны, расположенной в блоке первичного преобразователя. Она представляет собой плоский конденсатор на основе фольгированного стеклотекстолита с расположенными на нем кольцевыми прорезями и демпфирующими резистивными элементами [15, 16]. Блок фотоприемника, связанный ВОЛС с первичным преобразователем, подключается к осциллографическому регистратору. При использовании ВОЛС решается проблема паразитных наводок на линию связи, а также появляется возможность отнести блок фотоприемника на расстояние в десятки метров от первичного преобразователя, обеспечив безопасность оператора. Преобразователь ИП-Н имеет такое же устройство, как и ИП-Е, только вместо емкостной антенны используется индуктивная с RL-интегратором. В преобразователях ИП-Е и ИП-Н реализован встроенный генератор прямоугольных импульсов для учета ослабления сигнала волоконно-оптической линией, а также удаленное переключение поддиапазонов измерений.

Переходная характеристика преобразователей имеет двухэкспоненциальную форму с крутым фронтом длительностью от 1,5 до 10 нс и медленным спадом длительностью вплоть до единиц миллисекунд. При использовании в составе преобразователя быстродействующей лазерной волоконно-оптической линии связи, удается обеспечить время нарастания переходной характеристики порядка 0,1 нс [12]. За счет использования переключаемых аттенуаторов преобразователи имеют чрезвычай-

но широкий диапазон измерений от единиц вольт на метр до сотен киловольт на метр (для электрического поля). Пределы допускаемой погрешности измерений составляют $\pm 10\%$.

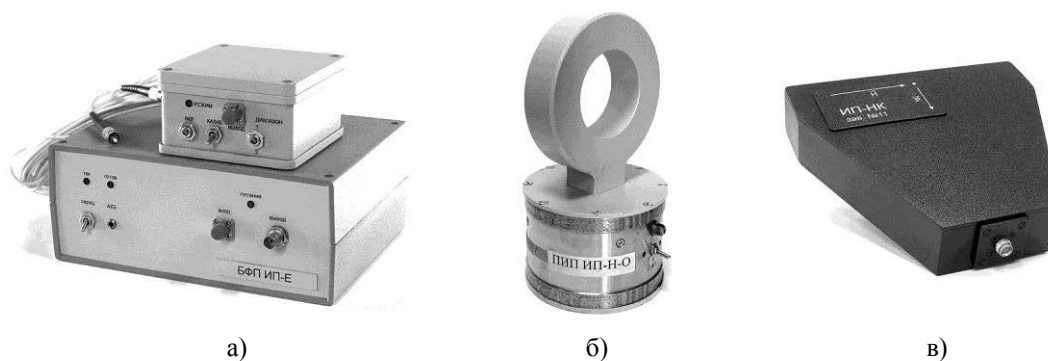


Рис. 1. Емкостные и индукционные преобразователи напряженности импульсного электрического и магнитного полей: а) - ИП-Е, б) - ИП-Н, в) – ИП-НК

Индукционный преобразователь ИП-НК выполнен по дифференциальной схеме с двумя катушками, намотанными на ферритовом сердечнике (см. рис. 1б). Первичный преобразователь снабжен пассивными RL -интеграторами, индуктивностями которых являются индуктивности катушек, а в качестве сопротивления используются высокочастотные резисторы. К выходу каждого интегратора подключены отрезки коаксиальных кабелей, намотанных на ферритовую линию задержки. Через симметрирующее устройство кабели подключаются к выходному разъему преобразователя. Характерное значение времени нарастания переходной характеристики преобразователя составляет 0,5 нс.

Внешний вид измерительного преобразователя на основе полосковой линии (ИППЛ) показан на рис. 2. Чувствительным элементом преобразователя является отрезок микрополосковой линии с согласованными нагрузками на концах [18]. К концу линии, обращенному к источнику излучения, подключается коаксиальная линия связи для соединения с осциллографическим регистратором.

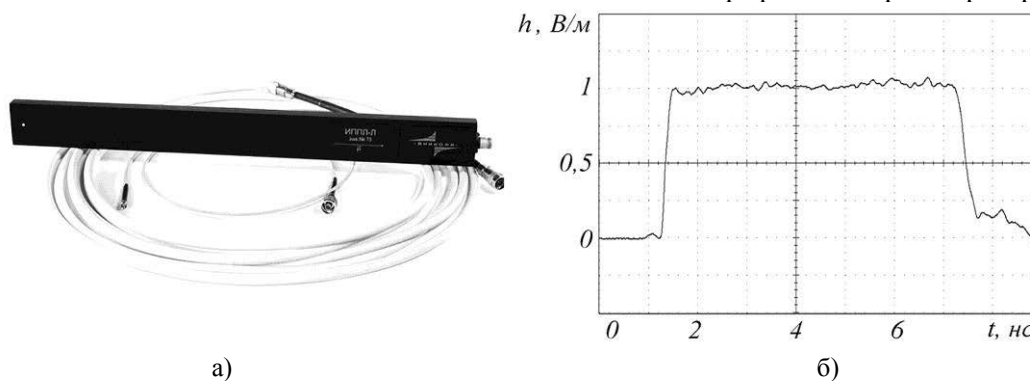


Рис. 2. Преобразователь напряженности импульсного электрического поля на основе полосковой линии: а) внешний вид, б) эпюра переходной характеристики

В общем случае сигнал напряжения на выходе преобразователя $U_{\text{вых}}(t)$ определяется выражением

$$U_{\text{вых}}(t) = K_{\text{п}} [E(t) * h'(t)],$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент преобразования, $E(t)$ – измеряемый импульс напряженности электрического поля, $h'(t)$ – импульсная характеристика преобразователя (первая производная по времени от переходной характеристики, то есть реакции на единичный ступенчатый сигнал), символом «*» обозначена операция свертки.

Достоинство ИППЛ в том, что он имеет ступенчатую форму переходной характеристики, то есть выходной сигнал по форме повторяет сигнал измеряемого ЭМИ в течение времени двойного пробега сигнала по линии [10, 19]. Поэтому в случае, если длительность фронта измеряемого импульса $t_{\text{ф}}$ по крайней мере в три раза больше $\tau_{\text{пк}}$ – времени нарастания переходной характеристики преобразователя ($t_{\text{ф}} \geq 3\tau_{\text{пк}}$), а длительность импульса не более длительности ступенчатого участка

переходной характеристики, амплитуда измеряемых импульсов напряженности электрического поля может быть определена по формуле

$$E(t) = U_{\text{вых}}(t) / K_{\text{п}}$$

Коэффициент преобразования $K_{\text{п}}$, определяется при калибровке преобразователя в эталонах, воспроизводящих ступенчатые импульсы напряженности электрического поля с минимальной длительностью фронта [20].

Характерная длительность ступенчатого участка переходной характеристики ИППЛ составляет 4–7 нс. При выполнении полосковой линии в виде меандра удается кратно увеличить длительность ступенчатого участка переходной характеристики (см. рис. 3). Такие модификации ИППЛ выпускаются в пристеночном (ИППЛ-М) и дифференциальном (ИППЛ-Д) вариантах. Характерное время нарастания переходной характеристики линейного ИППЛ находится в диапазоне от 35 до 50 пс, меандрических – от 100 до 500 пс. Пределы допускаемой погрешности измерений напряженности электрического поля составляют $\pm 10\%$, пределы допускаемой погрешности измерений временных интервалов составляют $\pm 15\%$.

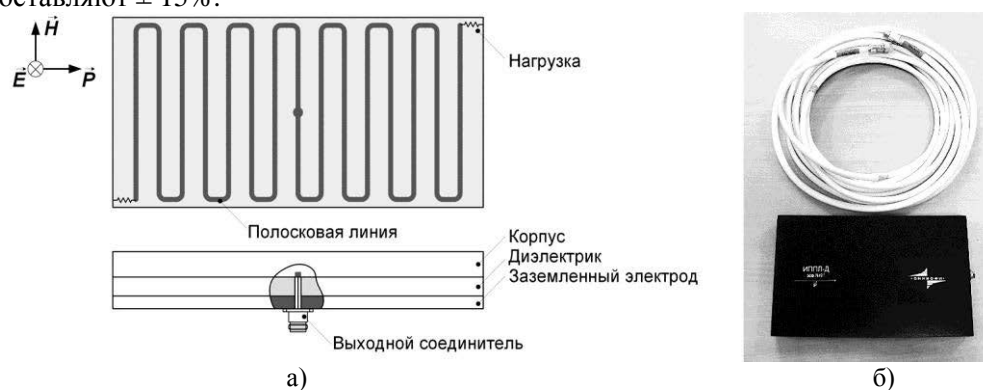


Рис. 3. Преобразователь напряженности импульсного электрического поля на основе меандрической полосковой линии: а – конструкция, б – дифференциальная модификация ИППЛ-Д

Основные метрологические характеристики емкостных, индукционных, а также полосковых преобразователей импульсов напряженности электрического и магнитного полей приведены в табл. 1. Хотя в описаниях типов средств измерений указаны расширенные диапазоны, в реальности многие метрологические характеристики являются взаимосвязанными. Например, в некоторых случаях невозможно обеспечить одновременно короткое время нарастания переходной характеристики преобразователя при большой постоянной спада.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики СИ параметров ЭМИ ЯВ

Название	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности измерений, %	Время нарастания переходной характеристики (0,1–0,9)	Длительность переходной характеристики (0,5) / Постоянная времени спада (0,37)
ИП-Е-(О)	1–10 ⁶ В/м	± 10	0,1–50 нс	50 мкс – 1 мс
ИП-Н-О	5·10 ⁻³ –5·10 ³ А/м	± 10	0,1–50 нс	10 мкс – 1 мс
ИП-НК	5·10 ⁻³ –5·10 ³ А/м	± 10	0,025–1,0 нс	0,05–1,0 мкс
ИППЛ-Л	5–5·10 ⁵ В/м	± 10	3–1,5·10 ² пс	0,1–10 нс
ИППЛ-М	5–5·10 ⁵ В/м	± 10	0,025–1,0 нс	10–250 нс
ИППЛ-Д	50–5·10 ⁵ В/м	± 20	0,050–1,0 нс	10–250 нс

Средства измерений ЭМП ВЛЭП и СБРК. Наиболее распространенным аварийным режимом высоковольтной линии электропередач является ее короткое замыкание, которое сопровождается резким увеличением токов линии, а ВЛЭП становится источником мощных электромагнитных помех [21]. При этом наиболее неблагоприятным фактором, воздействующим на объекты, является возникающее при коротком замыкании аперiodическое магнитное поле. Максимальное мгновенное значение напряженности магнитного поля под линией может составлять 4 кА/м, постоянная спада – от 0,07 до 0,1 с [2].

Имитаторы магнитных полей станций безобмоточного размагничивания кораблей описаны в работах [2, 22]. Такие имитаторы представляют собой кольца Гельмгольца, в которых формируются затухающие по амплитуде знакопеременные импульсы напряженности магнитного поля. Максимальное мгновенное значение напряженности магнитного поля может составлять от 8 до 24 кА/м, длительность фронта импульсов – 1 с [22].

Для измерения параметров импульсного магнитного поля в имитаторах ЭМП ВЛЭП в режиме короткого замыкания разработан измерительный преобразователь ИП ЭМП ВЛЭП. Он включает первичный измерительный преобразователь и блок фотоприемника, соединенные волоконно-оптической линией связи. Чувствительным элементом в блоке первичного преобразователя является термостабилизированный датчик Холла. Аналоговый сигнал с выхода датчика Холла оцифровывается и поступает в блок фотоприемника через ВОЛС. Блок фотоприемника соединяется с осциллографом с помощью радиочастотного коаксиального кабеля. Длина ВОЛС составляет 50 м, время непрерывной работы преобразователя до заряда аккумуляторной батареи – 4 часа.

Измерительный преобразователь ИП ЭМП ВЛЭП аналогичен по конструкции. В качестве чувствительного элемента также используется датчик Холла. Внешний вид преобразователя ИП ЭМП ВЛЭП показан на рис. 4. Основные метрологические характеристики ИП ЭМП ВЛЭП и ИП ЭМП СБРК приведены в табл. 2.



Рис. 4. Преобразователь напряженности импульсного магнитного поля ИП ЭМП ВЛЭП

Таблица 2

Основные метрологические характеристики ИП ЭМП ВЛЭП и СБРК

Название	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности измерений, %	Время нарастания переходной характеристики (0,1-0,9)	Длительность переходной характеристики (0,5)
ИП ЭМП ВЛЭП	$(0,1-4) \cdot 10^3$ А/м	± 10	0,3 мкс	не менее 1,5 с
ИП ЭМП СБРК	$(3-40) \cdot 10^3$ А/м	± 10	0,2 мс	не менее 10 с

Средства измерений импульсных токов грозового и электростатического разрядов. Как правило испытательный ток молнии, заданный в стандартах, включает три компоненты: первый импульс амплитудой вплоть до 200–250 кА, ток паузы (промежуточный ток) амплитудой 100–900 А и импульс повторного разряда амплитудой до 100–120 кА [1]. Длительность фронта первого импульса не превышает 5 мкс, длительность фронта повторного импульса находится в диапазоне от 0,2 до 1 мкс. Длительность промежуточного тока составляет порядка 0,5 с. Для контроля параметров импульсов тока, воспроизводимых в имитаторах грозового разряда, используются средства измерений, чувствительным элементом которых является шунт или индукционный преобразователь (например, пояс Роговского) [16]. Во ВНИИОФИ разработаны измерительные преобразователи импульсов тока молниевых разрядов на основе тубулярных шунтов с коаксиальными и волоконно-оптическими линиями связи. Основные метрологические характеристики преобразователей приведены в табл. 3.

Измерительные преобразователи ИТМ-200 применяются при испытаниях в ходе сертификации авиационной техники. ИТМ-200 представляют собой тубулярные шунты из нержавеющей стали с гофрированной стенкой [14, 23]. Из теории тубулярных шунтов известно, что время нарастания пе-

реходной характеристики определяется материалом шунта и толщиной стенки. Так как при протекании импульсов тока на шунт действуют электродинамические силы, сжимающие его в поперечном сечении, при слишком малой толщине стенки это может привести к деформации, нарушению контактов в силовой и измерительной цепи, а также к разрушению шунта. При применении гофрированной трубы токи, протекающие в смежных фрагментах гофрированной структуры навстречу друг другу, компенсируют магнитное поле, что не приводит к увеличению индуктивности шунта. Кроме того, гофрированная конструкция сохраняет прочность и плотность при деформациях, что дает возможность уменьшать толщину стенок для обеспечения требуемого времени нарастания переходной характеристики. Коэффициент преобразования (номинальное значение сопротивления) составляет 1,25 мОм. Время нарастания переходной характеристики ИТМ-200 не превышает 100 нс, верхняя граница диапазона измерений – 200 кА. Внешний вид ИТМ-200 показан на рис. 5а.

Таблица 3

Основные метрологические характеристики средств измерений импульсных токов грозового и электростатического разрядов

Название	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности измерений, %	Время нарастания переходной характеристики (0,1-0,9), нс	Длительность переходной характеристики (0,5)
ИТМ-200	$(1-200) \cdot 10^3$ А	± 5	100	–
КПТ	$0,1-10^5$ А	± 5	1-40	–
ШИ	$1-10^3$ А	± 10	10	–
ИП ГР-120	$(10-120) \cdot 10^3$ А	± 10	140	не менее 0,5 мс
КДТ	$0,1-100$ А	± 10	1	–
КДТ-М	$10-10^4$ А	± 10	50	–
ИП ЭР-400	$10-4 \cdot 10^2$ А	± 10	4	не менее 30 мкс

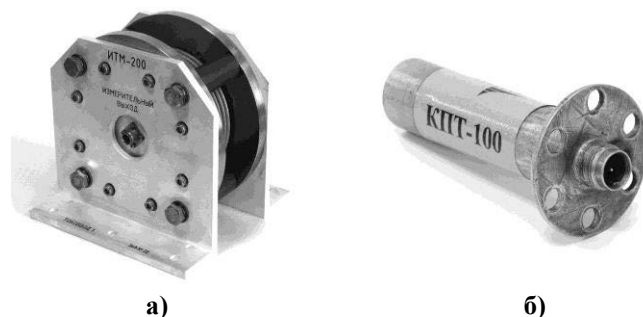


Рис. 5. Измерительные преобразователи силы импульсного тока молниевое разряда:
а) ИТМ-200, б) КПТ

Для измерения параметров импульсов тока с короткой длительностью фронта разработаны измерительные преобразователи КПТ. Они также представляют собой тубулярные шунты из манганиновой фольги. Преобразователи типа КПТ используются в составе ГЭТ 202-2012 как контрольные при передаче единиц вторичным и рабочим эталонам. Диапазон измерений силы импульсного тока составляет от 0,1 до 10^5 А, время нарастания переходной характеристики преобразователей находится в диапазоне от 1 до 40 нс. Внешний вид преобразователей показан на рис. 5б.

Аналогично на основе шунта изготовлен измерительный преобразователь ИП ГР-120. Данный преобразователь снабжен волоконно-оптической линией связи. Верхняя граница диапазона измерений ИП ГР-120 составляет 120 кА, время нарастания переходной характеристики – 140 нс, длительность переходной характеристики – не менее 0,5 мс.

Для метрологического обеспечения имитаторов электростатических разрядов ВНИИОФИ также разработан ряд средств измерений. В стандарте ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2) приведена конструкция коаксиального «датчика тока», применяемого для калибровки имитаторов электростатических разрядов [24]. Во ВНИИОФИ разработаны аналогичные по конструкции преобразователи силы импульсного тока электростатического разряда КДТ и КДТ-М (тубулярный шунт). Основные метрологические характеристики преобразователей приведены в таблице 3.

Для измерения параметров импульсов тока в имитаторах электростатических разрядов по моделям «оператор – объект» или «носитель – объект» [2] разработан измерительный преобразователь ИП ЭР-400. Преобразователь также снабжен волоконно-оптической линией связи. Первичный преобразователь выполнен в виде двух дифференциальных катушек индуктивности, которые располагаются симметрично относительно провода с измеряемым током. Интегрирование сигнала происходит на пассивном RL -интеграторе, где в качестве сопротивления выступают интегрирующие резисторы и собственное активное сопротивление провода катушек.

Средства измерений параметров сверхширокополосных электромагнитных импульсов. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на устойчивость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов проводят по стандартам ГОСТ 52863-2007 или IEC 6100-4-36 [10, 24]. Амплитудно-временные параметры воздействующих импульсов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Амплитудно-временные параметры испытательных СК ЭМИ

Параметр импульса	ГОСТ 52863-2007	IEC 61000-4-36
Амплитуда (электрическая составляющая), В/м	$10^2-3 \cdot 10^4$	$60-3 \cdot 10^4$
Длительность фронта (0,1–0,9), нс	–	0,1–0,5
Длительность (0,5), нс	0,1–1,0	0,2–5,0
Частота следования, Гц	$1-10^6$	$1-10^3$
Длительность пачки, с	–	1–10

Как следует из табл. 4 средство измерений, используемое для контроля параметров испытательных импульсов, должно иметь время нарастания переходной характеристики не более 50 пс, длительность переходной характеристики (постоянную времени) не менее 5 нс. Таким требованиям в полной мере удовлетворяют измерительные преобразователи на основе полосковой линии ИППЛ-Л, описанные ранее.

Для измерения параметров СК ЭМИ со сверхвысокой частотой повторения (следования) разработан полосково-рупорный измерительный преобразователь ИППЛ-Р [26]. Начальная часть в виде ТЕМ-рупора позволяеткратно увеличить чувствительность преобразователя по сравнению с полосковым преобразователем. Такжекратно увеличивается отношение полезного сигнала к помеховой наводке на линию связи. За счет изменения геометрии электродов рупора получено, что в течение 0,5 нс от начала импульса форма выходного сигнала ИППЛ-Р совпадает с формой выходного сигнала линейного полоскового преобразователя. Для дополнительного подавления помеховой наводки на линию связи используется кабельный ферритовый фильтр. Внешний вид такого преобразователя показан на рис. 6. Время нарастания переходной характеристики находится в диапазоне от 50 до 200 пс, длительность переходной характеристики – от 0,1 до 3,0 нс, пределы допускаемой погрешности измерений напряженности импульсного электрического поля $\pm 20\%$.



Рис. 6. Средства измерений сверхкоротких электромагнитных импульсов: а) ИППЛ-Р, б) быстродействующий ИППЛ-Л

Для измерения параметров СК ЭМИ в пикосекундном диапазоне разработаны быстродействующие измерительные преобразователи ИППЛ-Л [27]. Для уменьшения высокочастотных диэлектрических потерь начальный участок микрополосковой линии выполнен в виде линии с воздушным заполнением ($\epsilon_r = 1$). Длину воздушной части выбирают таким образом, чтобы без искажений регистрировать фронт измеряемого импульса [10]. Время нарастания переходной характеристики преоб-

разователя может составлять менее 5 пс, длительность ступенчатого участка – не менее 1,5 нс. Внешний вид такого преобразователя показан на рисунке 6. Быстродействующие преобразователи ИППЛ-Л могут применяться в электрофизических установках, для определения электромагнитных параметров радиопоглощающих материалов, для исследования характеристик антенн.

В практике испытаний достаточно часто случаются ситуации, когда необходимо оперативно оценить параметры воздействующего поля в различных точках испытательного объема. Для этого ВНИИОФИ разработаны автономные портативные детекторы напряженности импульсного электрического поля (см. рис. 7) [28]. Чувствительным элементом детектора также является полосковая линия, затем сигнал поступает на усилитель и каскадно включенные пиковые детекторы. Полученный квазипостоянный сигнал оцифровывается, обрабатывается и на светодиодном индикаторе отображается амплитуда воздействующих импульсов поля. Диапазон измерений амплитуды импульсов напряженности электрического поля составляет от 0,5 до 50 кВ/м, длительность измеряемых импульсов – от 0,1 до 0,5 нс, частота следования импульсов до 10 кГц, погрешность измерений $\pm 15\%$. Время автономной работы детектора составляет не менее 8 часов.



Рис. 7. Автономный портативный детектор напряженности импульсного электрического поля

Перспективные средства измерений. Перспективным направлением развития средств измерений импульсных электромагнитных полей, токов и напряжений является применение элементов радиофотоники. Развитие происходит в двух взаимосвязанных направлениях: во-первых, внедрение быстродействующих лазерных волоконно-оптических линий связи, а во-вторых, использование в качестве чувствительных элементов преобразователей электрооптических кристаллов.

Если средство измерений предназначено для работы в субнаносекундном или пикосекундном диапазонах, то по волоконно-оптической линии между первичным преобразователем и блоком фотоприемника необходимо передавать аналоговый, а не цифровой сигнал. Быстродействие аналоговых ВОЛС в основном ограничивается полосой пропускания фотоприемника. В последние годы на рынке появились сверхширокополосные фотоприемники с верхней граничной частотой полосы пропускания вплоть до 40 ГГц. В России на рынке представлены комплекты приемных и передающих оптических модулей с полосой пропускания от 0,01 до 16 ГГц [29]. Подобные быстродействующие оптические линии используются во вновь разрабатываемых средствах измерений импульсных электромагнитных полей и токов в случаях, когда необходимо измерять импульсы с коротким фронтом (сотни пикосекунд) и длительностью десятки-сотни микросекунд [12]. Кроме того, существующие СИ с коаксиальными линиями связи могут быть укомплектованы подобными ВОЛС для повышения помехоустойчивости, широкополосности, увеличения длины линии связи.

Вторым перспективным направлением развития средств измерений импульсных электромагнитных полей и токов является применение электрооптических кристаллов в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей. В таких чувствительных элементах реализуются электрооптические эффекты (Керра, Фарадея, Погкельса). Электрооптические кристаллы практически безынерционны, а первичные преобразователи, построенные на их основе, имеют малые размеры и в силу отсутствия металлических элементов не искажают картину измеряемого поля [30]. Соответственно, целесообразно применять подобные преобразователи при испытаниях для измерения напряженности поля внутри объекта. Также необходимо отметить принципиально новые преобразователи напряженности электрического поля, реализующие квантовые эффекты [31]. Фактически такие преобразователи могут использоваться как эталонные в прецизионных измерениях. На рис. 8 показаны измерительный преобразователь с электрооптическим кристаллом и преобразователь на квантовом эффекте Ауслера-Таунса.

Заключение. В настоящей работе дан обзор современных средств измерений параметров импульсных электрических и магнитного полей, а также импульсных токов, выпускаемых ВНИИОФИ. Как следует из таблиц 1 – 3 рассмотренные средства измерений позволяют охватить широкие амплитудные и временные диапазоны, полностью обеспечивая контроль параметров нагружения в имитаторах, а значит и гарантируя достоверность испытаний. Рассмотренные средства измерений внесены

в Федеральный информационный фонд СИ (Госреестр), обеспечена прослеживаемость средств измерений к Государственным первичным эталонам [33].

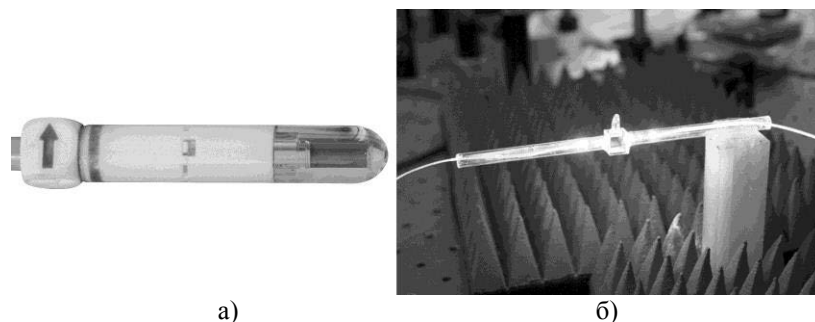


Рис. 8. Измерительные преобразователи на основе элементов радиофотоники: а) с электрооптическим кристаллом [32], б) на квантовом эффекте [31]

Список литературы

1. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 478 с.
2. Комягин С.И. Электромагнитная стойкость беспилотных летательных аппаратов. – М.: Красанд, 2015. – 432 с.
3. Балюк Н.В., Давыдов А.А., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н., Орлов С.Д. Воспроизведение параметров воздействия электромагнитных полей на объекты. – Сб. науч. трудов VI Всеросс. науч.-техн. конф. «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости ТехноЭМС-2019». – 2019. – С. 37–40.
4. Вишневский А.М., Городецкий Б.Н. Проблема обеспечения электромагнитной безопасности современных морских технических объектов. – Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – Т. 1. – № 387. – С. 143–154.
5. Городецкий Б.Н., Петров С.В. Экспериментальная база для решения проблемы обеспечения электромагнитной совместимости морских технических объектов и обеспечения их защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2015. – № 2. – С. 23–30.
6. Швец Н.Н., Кузнецов Ю.А., Сысоев В.С., Лепехин Н.М. Использование полигонной установки испытательного центра РФЯЦ-ВНИИТФ ВНИЦ (г. Истра) для испытаний электротехнического оборудования на стойкость к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва. – Сб. материалов XIV Междунар. конф. Забабахинские научные чтения. – 2019. – С. 1–10.
7. Фарамазян В.В., Ковалев В.Д. Установка для испытаний летательных аппаратов на молниестойкость. Патент РФ, № 2352502, 2009.
8. Акомелков Г.А., Золотаева М.В., Куприенко В.М., Романцов В.Н. Испытание бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. – Сб. науч. трудов VI Всеросс. науч.-техн. конф. «Электромагнитная совместимость». – 2017. – С. 210–217.
9. Михеев О.В., Туркин В.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А., Кузнецов Е.В. Средства измерений для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – № 2. – С. 17–21.
10. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Добротворский М.И., Сухов А.В. Измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля пикосекундной длительности. – Измерительная техника. – 2014. – № 2. – С. 62–64.
11. IEC 61000-4-36 EMC Part 4-36: Testing and measurement techniques - IEMI immunity test methods for equipment and systems. – IEC. – 2014. – 88 с.
12. Сухов А.В., Сахаров К.Ю., Михеев О.В., Туркин В.А., Уголев В.Л., Денисов М.Ю., Родин Р.А. Радиофотонный измерительный преобразователь напряжённости импульсного электрического поля в субнаносекундном диапазоне. – Измерительная техника. – 2018. – № 6. – С. 61–65.

13. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Сухов А.В. Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного тока молниевых разрядов в диапазоне 1-100 кА. – Измерительная техника. – 2013. – № 11. – С. 3–6.
14. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Денисов М.Ю., Уголев В.Л., Сухов А.В. Шунт для измерения импульсных токов на основе гофрированной трубы. – Метрология. 2014. – № 10. – С. 11–19.
15. IEC 61000-2-9. EMC - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance. – IEC. – 1996. – 52 с.
16. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
17. Молочков В.Ф., Неуструев В.В. Сверхширокополосный емкостный измерительный преобразователь импульсных электрических полей. Патент РФ, № 2463615, 2012.
18. Podosenov S.A., Sokolov A.A. Linear Two-Wire Transmission Line Coupling to an External Electromagnetic Field. Part I: Theory. – IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 1995. – V. 37. – № 4. – P. 559–566.
19. Sakharov K.Y., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorsky M.I., Sukhov A.V. Microstrip transducer for UWB EMP characterization. – Proc. of American Electromagnetics Symposium AMEREM-2014. – 2014. – P. 26.
20. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Добротворский М.И., Сухов А.В., Алешко А.И. Метрологическое обеспечение средств измерений параметров импульсных электрического и магнитного полей естественного и искусственного происхождения. – Измерительная техника. – 2016. – № 2. – С. 40–42.
21. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
22. Давыдов А.А., Плыгач В.А., Чибисов Ю. Электромагнитные факторы природного и техногенного происхождения и способы их воспроизведения при испытаниях объектов вооружения и военной техники. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 1. – С. 38–48.
23. Сахаров К.Ю., Михеев О.В., Туркин В.А., В.Л. Уголев, М.Ю. Денисов, Б.В. Константинов, А.В. Сухов. Измерительный шунт. Патент РФ, № 146543, 2014.
24. ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 50 с.
25. ГОСТ Р 52863-2007. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2007. – 39 с.
26. Алешко А.И., Соколов А.А., Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Корнев А.Н. Датчик напряженности электрического поля сверхкоротких электромагнитных импульсов со сверхвысокой частотой повторения. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – № 2. – С. 22–25.
27. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Добротворский М.И., Сухов А.В.. Устройство для измерения параметров электромагнитного импульса со сверхкороткой длительностью фронта. Патент РФ, № 2468375, 2012.
28. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Сухов А.В., Лафишев М.А., Еряшев Д.И. Аппаратура для мониторинга электромагнитных излучений в сверхкороткоимпульсном диапазоне длительностей. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2011. – № 4. – С. 58–61.
29. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И., Иванов Д.В., Однолюбов М.А., Царук А.А. Исследование характеристик модулей передатчиков с внутренней и внешней модуляцией в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ радиосигналов. – Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 69–73.
30. Долматов Т.В., Букин В.В., Сахаров К.Ю., Сухов А.В., Гарнов С.В., Терехин В.А. Сверхширокополосный электрооптический преобразователь напряженности импульсного электрического поля. – Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 42–44.
31. Holloway C., Simons M., Gordon J. Development of A New Atom-Based SI Traceable Electric-Field Metrology Technique. – Proc. of Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA). – 2017. – P. 1–5.

32. Gaborit G., Jarrige P., Gaeremynck Y., Warzecha A., Bernier M., Lassere J.-L., Duvillaret L. Pockels'Effect Based Probe for UWB and NPEM Measurements. – Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics-10. – 2014. – P. 411–423.
33. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Добротворский М.И., Сухов А.В., Алешко А.И. Метрологическое обеспечение измерений параметров сильных импульсных электромагнитных полей в субнаносекундном диапазоне. – Измерительная техника. – 2015. – № 9. – С. 48–52.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ»). Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46.

Авторы

Сахаров Константин Юрьевич, д-р техн. наук, начальник лаборатории, ФГУП «ВНИИОФИ»; Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46. Тел. (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru.

Туркин Владимир Анатольевич, канд. техн. наук, заместитель начальника лаборатории, ФГУП «ВНИИОФИ»; Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46. Тел. (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru.

Михеев Олег Викторович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «ВНИИОФИ»; Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46. Тел. (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru.

Сухов Александр Витальевич, канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГУП «ВНИИОФИ»; Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46. Тел. (495) 781-44-60, e-mail: sukhov@vniiofi.ru.

Уголев Владимир Леонидович, ведущий инженер, ФГУП «ВНИИОФИ»; Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46. Тел. (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru.

Денисов Михаил Юрьевич, ведущий инженер, ФГУП «ВНИИОФИ»; Российская Федерация, г. Москва, 119361, ул. Озерная, д. 46. Тел. (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru.

Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Sukhov A. V., Ugolev V. L., Denisov M. Yu.

Measuring Instruments of Transient Electromagnetic Fields and Currents

Abstract. The modern measuring instruments of transient electric and magnetic fields, as well as impulse currents, are considered. These measuring instruments are used in simulators of electromagnetic factors of natural and artificial origin in order to control the parameters of exposure during testing procedure.

Measuring instruments of nuclear explosion electromagnetic pulse parameters have sensors in the form of condenser antenna, inductive coil and strip line. These measuring instruments are equipped with fiber-optic communication lines. Transient electric field instruments cover an amplitude range from 1 V/m to 500 kV/m (magnetic field from 5 mA/m to 5 kA/m) and a time range from several picoseconds to tens of milliseconds. Such a measuring instruments can be used during tests according to MIL-STD 461 (RS105) and IEC 61000-4-25.

Measuring instruments of impulse currents are based on shunt and inductive coil. They are designed for use in lightning and electrostatic discharge tests. These instruments cover an amplitude range of 0.1 A to 200 kA and a time range of 1 ns to 1 ms.

Measuring instruments for ultra-short electromagnetic pulses are used in tests according to GOST 52863-2007 and IEC 61000-4-36 standards. The rise time of fast strip line transducers is no more than 5 ps. TEM-horn transducers are intended for measurement of EMP with high frequency of repetition in severe interference conditions.

Key words: measuring instrument, electromagnetic pulse, impulse current, lightning discharge, electrostatic discharge, test, simulator

References

1. Baliuk N.V., Kechiev L.N., Stepanov P.V. *Moshchnyi elektromagnitnyi impul's: vozdeistvie na elektronnye sredstva i metody zashchity* [High-power EMP: effects on electronics and methods of protection]. Moscow, OOO «Gruppa IDT» Publ., 2007. 478 p. (In Russian)
2. Komiagin S.I. *Elektromagnitnaia stoikost' bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Electromagnetic immunity of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Krasand Publ., 2015. 432 p. (In Russian)
3. Baliuk N.V., Davydov A.A., Krokhaliev D.I., Matiukhevich S.N., Orlov S.D. Vosproizvedenie parametrov vozdeistviia elektromagnitnykh polei na ob"ekty [The reproducing of parameters of electromagnetic field impact on objects]. *Sbornik nauchnykh trudov VI Vseross. nauch.-tekhn. konf. «Tekhnologii, izmereniia i ispytaniia v oblasti elektromagnitnoi sovmestivosti TekhnoEMC-2018» – Proc. Of VI All-Russian sc.-tech. conf. “Technologies, measurements and tests in electromagnetic compatibility TechnoEMC-2019”*, 2019, pp. 37–40. (In Russian)
4. Vishnevskii A.M., Gorodetskii B.N. Problema obespecheniia elektromagnitnoi bezopasnosti sovremennykh morskikh tekhnicheskikh ob"ektov [A problem of ensuring electromagnetic safety of modern marine technical facilities]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra – Proc. Of Krylov state research center*, 2019, vol. 1, no. 387, pp. 143–154. (In Russian)
5. Gorodetskii B.N., Petrov S.V. Eksperimental'naiia baza dlia resheniia problemy obespecheniia elektromagnitnoi sovmestivosti morskikh tekhnicheskikh ob"ektov i obespecheniia ikh zashchity ot prednamerennykh silovykh elektromagnitnykh vozdeistvii [Experimental base for solving the problem of ensuring electromagnetic compatibility of marine technical facilities and ensuring their protection from intentional power electromagnetic effects]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestivosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2015, no. 2, pp. 23–30. (In Russian)
6. Shvets N.N., Kuznetsov Iu.A., Sysoev V.S., Lepekhin N.M. Ispol'zovanie poligonnoi ustanovki ispytatel'nogo tsentra RFIaTs-VNIITF VNITs (g. Istra) dlia ispytaniia elektrotekhnicheskogo oborudovaniia na stoikost' k elektromagnitnomu impul'su vysotnogo iadernogo vzryva [Use of the facility of the testing center RFIaTs-VNIITF VNITs (Istra) for testing of electrical equipment for immunity to electromagnetic pulse of high-altitude nuclear explosion]. *Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoi konferencii Zababakhinskie nauchnye chteniia – Proc. of XIV International Conf. Zababakhin science readings*, 2019, pp. 1–10. (In Russian)
7. Faramazian V.V., Kovalev V.D. *Ustanovka dlia ispytaniia letatel'nykh apparatov na molniestoikost'* [A facility for aerial vehicles testing to lightning discharge]. Patent RF, no. 2352502, 2007. (In Russian)
8. Akomelkov G.A., Zolotaeva M.V., Kuprienko V.M., Romantsov V.N. Ispytanie bortovogo aviatsionnogo oborudovaniia na vospriimchivost' k perekhodnym protsessam, vyzvannym molniei [Testing of onboard aircraft equipment for lightning induced transients]. *Sbornik nauchnykh trudov VI Vseross. nauchn.-tekhn. konf. «Elektromagnitnaia sovmestivost'» – Proc. Of VI All-Russian sc.-tech. conf. “Electromagnetic compatibility”*, 2017, pp. 210–217. (In Russian)
9. Mikheev O.V., Turkin V.A., Sakharov K.Yu., Sokolov A.A., Kuznetsov E.V. Sredstva izmerenii dlia ispytaniia radioelektronnoi apparatury na stoikost' k vozdeistviu sverkhkorotkikh elektromagnitnykh impul'sov [Measuring instruments for testing of radioelectronic equipment for immunity to ultra-short electromagnetic pulses]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestivosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2006, no. 2, pp. 17–21. (In Russian)
10. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorsky M.I., Sukhov A.V. A Picosecond Pulsed Electric Field Strength Measuring Transducer. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 2, pp. 201–205.
11. IEC 61000-4-36. EMC - Part 4-36: Testing and measurement techniques - IEMI immunity test methods for equipment and systems. IEC, 2014. 88 p.
12. Sukhov A.V., Sakharov K.Yu., Mikheev O.V., Turkin V.A., Ugolev V.L., Denisov M.Yu., Rodin R.A. Microwave Photonic Detector for Measuring Pulsed Electric Field Strengths in the Sub-Nanosecond Region. *Measurement Tehcniques*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 627–632.
13. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Sukhov A.V. National Primary Special Standard for the Unit of Pulsed Lightning Discharge Current in the 1–100 kA Range. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 56, no. 11, pp. 1203–1208.
14. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Denisov M.Yu., Ugolev V.L., Sukhov A.V. A Shunt for Measurements of Pulse Currents Based on a Corrugated Tube. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57,

- no. 12, pp. 1451-1456.
15. IEC 61000-2-9. EMC - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance. IEC, 1996. 52 p.
 16. Kravchenko V.I. *Grozozashchita radioelektronnykh sredstv* [Lightning protection of electronics]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1991. 264 p. (In Russian)
 17. Molochkov V.F., Neustruev V.V. *Sverkhshirokopolosnyi emkostnyi izmeritel'nyi preobrazovatel' impul'snykh elektricheskikh polei* [Ultra-wideband capacitive measuring transducer of transient electric field]. Patent RF, no. 2463615, 2012. (In Russian)
 18. Podosenov S.A., Sokolov A.A. Linear Two-Wire Transmission Line Coupling to an External Electromagnetic Field. Part I: Theory. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 1995, vol. 37, no. 4, pp. 559–566.
 19. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorsky M.I., Sukhov A.V. Microstrip transducer for UWB EMP characterization. *Proc. of American Electromagnetics Symposium AMEREM-2014*, 2014, p. 26.
 20. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorsky M.I., Sukhov A.V., Aleshko A.I. Metrological Assurance of Devices Intended to Measure the Parameters of Pulsed Electric and Magnetic Fields of Natural and Artificial Origin. *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 160-163.
 21. Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I. *Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomekhi* [Electronic devices and high-power electromagnetic interference]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1987. 256 p. (In Russian).
 22. Davydov A.A., Plygach V.A., Chibisov Iu.. *Elektromagnitnye faktory prirodno i tekhnogenno proiskhozhdeniia i sposoby ikh vosproizvedeniia pri ispytaniakh ob"ektov vooruzheniia i voennoi tekhniki* [Electromagnetic factors of natural and artificial origin and methods of their reproduction during testing of weapons and military equipment]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti* [Technologies of Electromagnetic Compatibility], 2010, no. 1, pp. 38–48. (In Russian).
 23. Sakharov K.Yu., Mikheev O.V., Turkin V.A., Ugolev V.L., Denisov M.Yu., Konstantinov B.V., Sukhov A.V. *Izmeritel'nyi shunt* [Measuring shunt]. Patent RF, no. 146543, 2014. (In Russian).
 24. State Standard 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Electromagnetic compatibility of technical devices. Immunity to electrostatic discharge. Testing techniques. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 50 p. (In Russian).
 25. State Standard 52863-2007. Information security. Protected automated systems. Tests for immunity to intentional electromagnetic influences. General requirements. Moscow, Standardinform Publ., 2007. 39 p. (In Russian)
 26. Aleshko A.I., Sokolov A.A., Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Kornev A.N. *Datchik napriazhennosti elektricheskogo polia sverkhkorotkikh elektromagnitnykh impul'sov so sverkhvysokoi chastotoi povtoreniia* [Electric field strength sensor of ultra-short electromagnetic pulses with ultrahigh repetition frequency]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti* [Technologies of Electromagnetic Compatibility], 2006, no. 2, pp. 22-25. (In Russian).
 27. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorsky M.I., Sukhov A.V. *Ustroistvo dlia izmereniia parametrov elektromagnitnogo impul'sa so sverkhkorotkoi dlitel'nost'iu fronta* [Device for measuring electromagnetic pulse parameters with ultra-short rise time]. Patent RF, no. 2468375, 2012. (In Russian).
 28. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Sukhov A.V., Lafishev M.A., Eriashv D.I. *Apparatura dlia monitoringa elektromagnitnykh izlucheni v sverkhkorotkoimpul'snom diapazone dlitel'nostei* [Equipment for monitoring electromagnetic radiation in the ultra-short pulse range]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti* [Technologies of Electromagnetic Compatibility], 2011, no. 4, pp. 58-61. (In Russian).
 29. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I., Ivanov D.V., Odnoliubov M.A., Tsaruk A.A. *Issledovanie kharakteristik modulei peredatchikov s vnutrennei i vneshnei moduliatsiei v analogovykh volokonno - opticheskikh liniakh peredachi SVCh radiosignalov* [Investigation of characteristics of transmitter modules with internal and external modulation in analog fiber-optic transmission lines of microwave radio signals]. *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Microwave electronics and microelectronics], 2016, vol. 2, no. 1, pp. 69–73. (In Russian).

30. Dolmatov T.V., Bukin V.V., Sakharov K.Yu., Sukhov A.V., Garnov S.V., Terekhin V.A. A Superbroadband Electro-Optical Pulsed Electric Field Strength Converter. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1179-1183.
31. Holloway C., Simons M., Gordon J. Development of A New Atom-Based SI Traceable Electric-Field Metrology Technique. *Proc. of Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA). Atlanta*, 2017. pp. 1–5.
32. Gaborit G., Jarrige P., Gaeremynck Y., Warzecha A., Bernier M., Lassere J.-L., Duvillaret L. Pockels'Effect Based Probe for UWB and HPEM Measurements. *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 10*, 2014, pp. 411–423.
33. Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorsky M.I., Sukhov A.V., Aleshko A.I. The Metrological Support for Measurements of the Parameters of Intense Pulsed Electromagnetic Fields in the Subnanosecond Range. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 1023–1028.

Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements”, Ozernaya st. 46, 119361, Moscow, Russian Federation

Authors

Sakharov, Konstantin Yu., Dr. Sc., head of laboratory, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya 46, Moscow, 119361, Russia. Tel.: (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru

Turkin, Vladimir A., Ph.D., deputy head of laboratory, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya 46, Moscow, 119361, Russia. Tel.: (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru

Mikheev, Oleg V., Ph.D., leading researcher, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya 46, Moscow, 119361, Russia. Tel.: (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru

Sukhov, Alexander V., Ph.D., researcher, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya 46, Moscow, 119361, Russia. Tel.: (495) 781-44-60, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

Ugolev, Vladimir L., principal engineer, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya 46, Moscow, 119361, Russia. Tel.: (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru

Denisov, Mikhail Yu., principal engineer, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya 46, Moscow, 119361, Russia. Tel.: (495) 781-44-60, e-mail: m12@vniiofi.ru

УДК 537.868

**И.В. Акиншин, Н.В. Балюк, В.М. Жихарев, Д.И. Крохалев,
С.Н. Матюхевич, А.В. Пыж, Д.Н. Ушанов**

Методы и средства испытаний технических средств на помехоустойчивость в условиях воздействия мощных радиочастотных электромагнитных полей

В статье проанализированы технические возможности отечественных и зарубежных испытательных центров по формированию гармонических электромагнитных полей при проведении испытаний технических средств, содержащих радиоэлектронную аппаратуру. Рассмотрены особенности реализации различных методов испытаний на действие радиочастотных электромагнитных полей с учетом характеристик существующего испытательного оборудования.

В России наиболее крупной и технически оснащенной базой для проведения испытаний технических средств на действие мощных электромагнитных полей является испытательная база 12 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны. В институте имеется широкий выбор методов испытаний и испытательных установок, что позволяет проводить испытания на высоком научно-техническом уровне. Постоянно проводятся работы по модернизации и разработке испытательных установок, а также исследования по совершенствованию методологии испытаний.

Ключевые слова: антенна, метод испытаний, помехоустойчивость, радиотехнические средства, испытательная установка, электромагнитное поле

Современные технические средства насыщены радиоэлектронной аппаратурой (РЭА), функционирующей при малых значениях электрического тока и напряжения. Это делает РЭА восприимчивой к непреднамеренным электромагнитным воздействиям. Обеспечение помехоустойчивости РЭА к действию электромагнитных полей (ЭМП) радиотехнических средств (РТС) является неизменным условием длительной бесперебойной работы технических средств.

Экспериментальная оценка стойкости РЭА при воздействии электромагнитных полей РТС проводится в ходе исследований с использованием установок-имитаторов, применение которых определяется их техническими возможностями и методическим обеспечением.

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом существует два основных принципа воспроизведения воздействия электромагнитных полей РТС, получивших название прямых и косвенных методов. При использовании прямых методов с помощью источника гармонического сигнала в локальных объемах либо путем излучения в окружающее пространство воспроизводят электромагнитные поля, которыми облучают исследуемый образец. При использовании косвенных методов имитируют результат действия электромагнитных полей РТС на тот или иной объект в виде наведенных гармонических токов, протекающих по элементам конструкции, напряжений, наведенных на входах аппаратуры, а также полей во внутренних объемах с определенными амплитудными характеристиками. В некоторых случаях (например, когда невозможно обеспечить полномасштабное воспроизведение воздействия на все основные электромагнитные связи объекта с окружающей средой) применяют комбинацию этих двух методов.

Реализация прямых методов в зависимости от диапазона частот, применяемых установок может проводиться различными способами.

Например, в диапазоне частот 5–30 МГц при условии, что имеются специальные усилители большой мощности и крупногабаритные антенные системы, размер которых сопоставим с размерами объекта испытаний, объект испытаний размещают на открытой площадке и облучают его целиком ЭМП с уровнями высокой интенсивности, указанными в нормативной документации.

В настоящее время данный способ реализован в испытательном центре CASSIDIAN EME Test Facility (г. Инголстадт, Германия) [1]. Установка для формирования ЭМП вертикальной поляризации и представляет собой сдвоенную 16-элементную логопериодическую антенну шириной 40 м, длиной 40 м и высотой 25 м. Внешний вид антенны представлен на рис. 1. Испытательный объем установки составляет в длину 40 м, в ширину 35 м, в высоту 12 м. При подключении 100 кВт усилителя установка в диапазоне частот от 5 до 30 МГц формирует в испытательном объеме поле с амплитудой до 250 В/м. Сходными параметрами обладает и установка для формирования ЭМП горизонтальной поляризации. Она представляет собой систему из двух наклонных логопериодических антенн, разнесенных по высоте. Антенны развернуты в горизонтальной плоскости таким образом, что угол между их продольными осями составляет 90° . Испытательный объем установки составляет в длину 20 м, в ширину 15 м, в высоту 6 м. При подключении 100 кВт усилителя установка в диапазоне частот от 5 до 30 МГц формирует в испытательном объеме поле с амплитудой до 250 В/м.

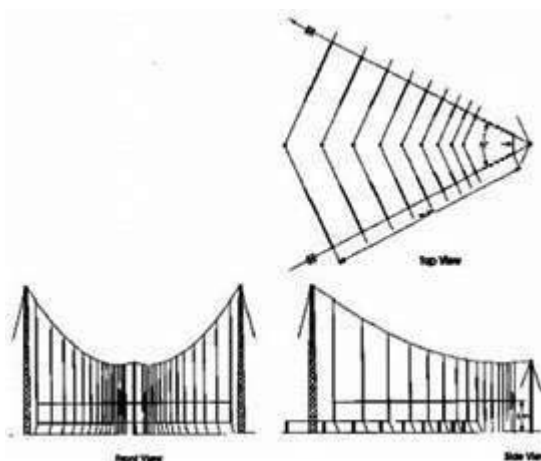


Рис. 1. Сдвоенная логопериодическая антенна центра CASSIDIAN EME Test Facility для формирования вертикально поляризованного поля в диапазоне частот 5–30 МГц

Аналогичный подход, с размещением объекта испытаний на открытых испытательных площадках, оборудованных крупногабаритными антеннами, реализован в испытательном центре QinetiQ CEO (аэропорт Боскомбе Даун, Англия) [1]. Для формирования ЭМП вертикальной поляризации в диапазоне частот от 5 до 30 МГц используется сдвоенная 26-элементная логопериодическая антенна, внешний вид которой представлен на рис. 2. Ширина конструкции составляет 30 м, длина – 36 м, высота – 12 м. При подключении 25 кВт усилителя установка формирует в испытательном объеме на расстоянии 15 м электромагнитное поле вертикальной поляризации с амплитудой 200 В/м [1]. Для формирования ЭМП горизонтальной поляризации используется 15-элементная логопериодическая антенна (рис. 3), элементы которой расположены в вертикальной плоскости [1]. Высота антенны составляет 25 м, ширина – 42 м.



Рис. 2. Сдвоенная логопериодическая антенна центра QinetiQ CEO для формирования вертикально поляризованного поля в диапазоне частот 5–30 МГц

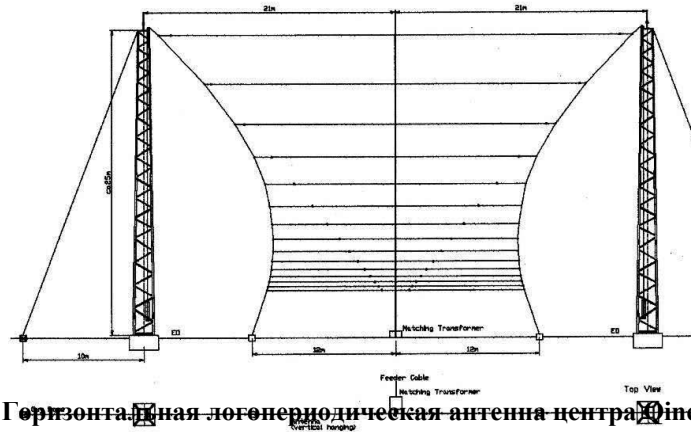


Рис. 3. Горизонтальная логопериодическая антенна центра DimetiQ CEO

Figure 1: Antenna layout

Следует отметить, что обеспечить методически правильный подход при формировании испытательного воздействия в диапазоне частот 5–30 МГц, используя только указанное оборудование, невозможно. Это связано с существенным влиянием в рассматриваемом частотном диапазоне подстилающей поверхности на результаты взаимодействия испытательных полей и объекта испытаний. Для устранения влияния земли необходимо использование безэховых камер, которые в рассматриваемом диапазоне частот обладают низкой эффективностью, или специальных диэлектрических подъемников. Кроме того, исследования показывают, что, вследствие сложного характера диаграммы восприимчивости объекта испытаний и его составных элементов, для обеспечения максимального воздействия его необходимо облучать не с 2–3, а с нескольких десятков направлений [2]. Для решения этих задач в CASSIDIAN EME Test Facility используется подъемная радиопрозрачная поворотная платформа (рис. 4), которая позволяет поднимать самолеты массой до 30 т на высоту до 20 м и обеспечивает их круговое вращение.



Рис. 4. Диэлектрическая подъемная платформа центра CASSIDIAN EME Test Facility

В Российской Федерации подобное испытательное оборудование отсутствует. Связано это в первую очередь с тем, что отсутствует требуемое усилительное оборудование. Для того чтобы реализовать высокие уровни и требуемую однородность ЭМП, у нас в основном используются установки с полеобразующей системой в виде несимметричной полосковой линии. Такие установки имеются в Испытательном центре технических средств по требованиям электромагнитной совместимости, безопасности и внешних воздействующих факторов ВНИИ им Н.Л.Духова, 23 Государственном морском проектном институте, 12 ЦНИИ Минобороны России [3].

Следует отметить, что, по сравнению с излучающими антеннами, полосковые линии позволяют снизить требования к мощности источника сигнала и эффективно работают в диапазоне частот ниже 5 МГц. К недостаткам этих полеобразующих систем относится ограниченный частотный диапазон использования и трудность формирования ЭМП горизонтальной поляризации.

Наиболее крупной среди отечественных установок является ИРЧЭМП (12 ЦНИИ Минобороны России). Она предназначена для проведения испытаний технических средств на помехоустойчивость

в условиях воздействия мощных радиочастотных электромагнитных полей в диапазоне частот 1,5–30 МГц. Для воспроизведения полей используется полосковая линия длиной 12 м, шириной 10 м, высотой 4 м (см. рис. 5) и усилитель мощностью 8 кВт. Для более эффективного использования энергетического потенциала источника установки в ряде случаев возникает необходимость изменения размеров полеобразующей системы. Однако это приводит к изменению волнового сопротивления и ухудшению пространственного распределения компонент поля. Поэтому специалистами 12 ЦНИИ Минобороны России проводятся исследования по модернизации установки, которая позволит изменить рабочий объем установки без ухудшения ее характеристик [4].

Полосковые линии для формирования ЭМП используются и за рубежом. Например, в испытательном центре Alenia Aeronautica S.p.A. (г. Турин, Италия) имеется полосковая линия (см. рис. 6) шириной 18 м, длиной 55 м, высотой 10 м [1]. При подключении 20 кВт усилителя мощности внутри установки в диапазоне частот 5–30 МГц формируется вертикально поляризованное поле амплитудой 100 В/м. Также для формирования вертикально поляризованных ЭМП амплитудой 50 В/м в этом центре используется штыревая антенна высотой 15 м и диаметром – 6 м [1]. Внешний вид антенны представлен на рис. 7. Для формирования в диапазоне частот от 5 до 30 МГц мощных ЭМП горизонтальной поляризации используется антенна, внешний вид которой представлен на рис. 8. Эта антенна представляет собой широкодиапазонный наклонный вибратор, концы которого заземлены через сопротивление. Длина плеча вибратора составляет 26 м, высота установки – 10 м [1]. При подключении 20 кВт усилителя мощности напряженность поля на расстоянии 10 м от антенны составляет 50–150 В/м.

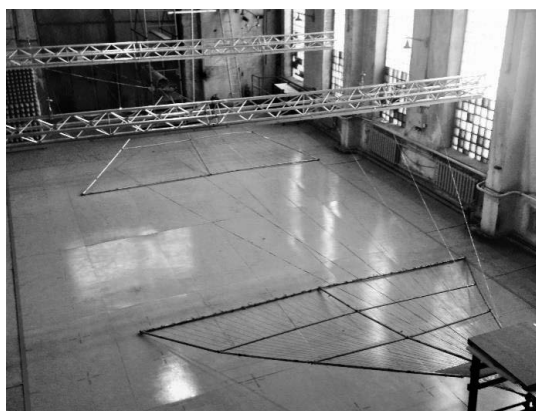


Рис. 5. Полеобразующая система установки ИРЧЭМП

Для частот более 30 МГц единственным способом реализации прямого метода воспроизведения воздействия электромагнитных полей РПС является применение установок с излучающими антеннами. Основными типами антенн, позволяющими формировать высокие уровни полей, являются логопериодические и рупорные антенны. Логопериодические антенны в основном применяются от 30 МГц и до сотен МГц, хотя существуют и антенны с частотным диапазоном до единиц ГГц. Рупорные антенны используются приблизительно с частоты 200 МГц. В зависимости от частотного диапазона и мощности передающего устройства с помощью антенн можно создать поле напряженностью десятки – сотни В/м.

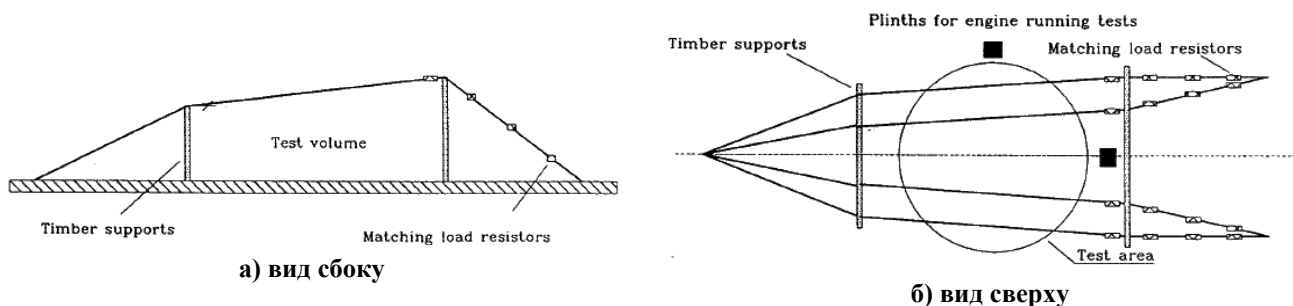


Рис. 6. Полосковая линия центра Alenia Aeronautica S.p.A.

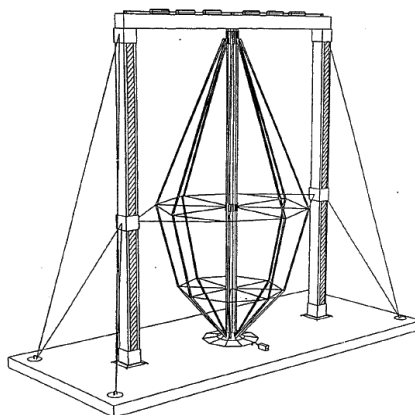


Рис. 7. Вертикальный объемный несимметричный вибратор центра Alenia Aeronautica S.p.A.

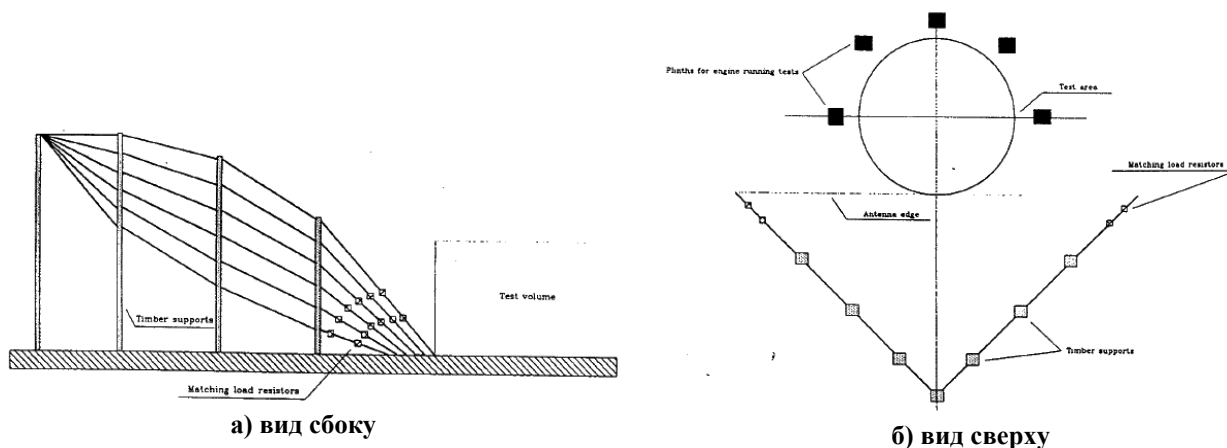


Рис. 8. Перевернутая V-образная антенна центра Alenia Aeronautica S.p.A.

Например, в испытательном центре White Sands Test Center (США) установлены две логопериодические антенны типа LP-16800-A-L. Внешний вид антенн приведен на рис. 9. Антенна, расположенная в правой части рисунка, воспроизводит горизонтально поляризованное поле, вторая, расположенная слева, – вертикально поляризованное. Длина антенн составляет 11,3 м, ширина – 4,3 м. Антенны рассчитаны на подключение к усилителю мощностью до 50 кВт в диапазоне частот 30–100 МГц [1]. При этом напряженность поля на расстоянии 5 м от антенны составляет 150–400 В/м.

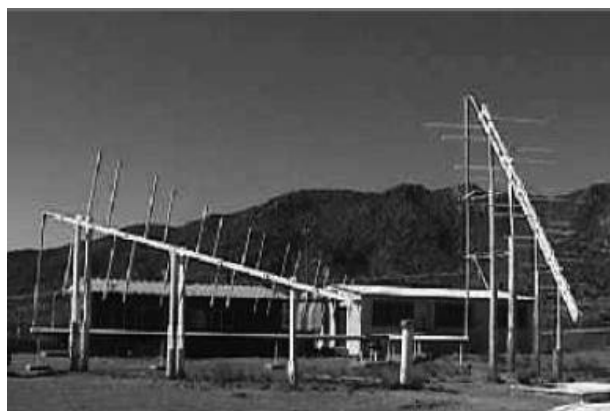


Рис. 9. Внешний вид ЛПА типа LP-16800-A-L центра White Sands Test Center

В CASSIDIAN EME Test Facility для формирования ЭМП в диапазоне частот 30–100 МГц используется 16-элементная логопериодическая антенна, чертеж которой приведен на рис. 10. Длина

антенны составляет 6 м, а ширина – 5 м. Свыше 100 МГц могут использоваться двойные ЛПА, например, как в испытательном центре QinetiQ CEO (см. рис. 11). Смена поляризации осуществляется путем поворота антенны. При подключении к логопериодическим антеннам усилителей мощностью 10 кВт амплитуда формируемых гармонических ЭМП составляет 250 В/м [1].

Свыше 200 МГц для испытаний также используются рупорные антенны. Например, в Alenia Aeronautica S.p.A. на установке мощностью 4 кВт с использованием системы рупорных антенн, представленной на рис. 12, в диапазоне 200–300 МГц обеспечивается формирование ЭМП амплитудой 300–400 В/м [1]. В испытательном центре QinetiQ CEO для проведения испытаний в диапазоне частот 200–1000 МГц также используется установка с рупорными антеннами. Амплитуда формируемых полей при мощности усилителя 1 кВт составляет 150 В/м [1].

На отечественных испытательных базах также используются установки, оснащенные логопериодическими и рупорными антеннами. Но их размеры в несколько раз меньше, а мощность усилителей не превышает 1 кВт. Например, в состав испытательного оборудования 12 ЦНИИ Минобороны России входит установка мощностью 1 кВт, позволяющая при использовании логопериодической антенны формировать в диапазоне частот 30–1000 МГц электромагнитное поле с напряженностью 100–200 В/м. В диапазоне частот 1–18 ГГц используется оборудование мощностью 0,5–1 кВт, которое при подключении рупорных антенн обеспечивает плотность потока энергии 700–1300 Вт/м². В диапазоне частот 18–40 ГГц имеется оборудование мощностью 60 Вт [3].

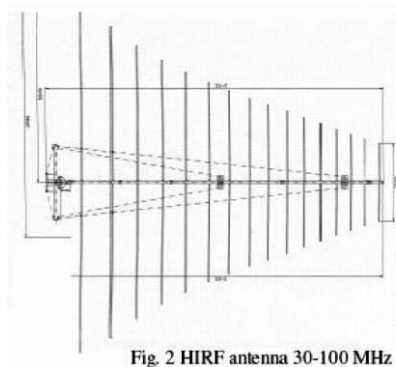


Рис. 10. ЛПА для диапазона частот 30–100 МГц центра CASSIDIAN EME Test Facility



Рис. 11. Сдвоенная логопериодическая антенна центра QinetiQ CEO

Следует отметить, что с увеличением частоты формируемого электромагнитного поля уменьшаются размеры антенн и рабочие объемы установок-имитаторов, что не позволяет облучать крупногабаритные объекты испытаний целиком. Вместе с тем, результаты исследований показывают [5], что, начиная приблизительно с частот свыше 100 МГц, основным механизмом воздействия на системы, аппаратуру и оборудование технических средств является поле, проникающее внутрь его корпуса через разнообразные электрические неоднородности и радиопрозрачные участки корпуса. Вследствие этого, параметры токов, наведенных во внутренних цепях, определяются в основном теми источниками, которые расположены в непосредственной близости. Исследования показывают хо-

рошую сходимость параметров токов во внутренних цепях при локальном облучении и при воздействии плоской волны [5]. Поэтому вполне обоснованно при испытаниях крупногабаритных технических средств применять локальное облучение, при котором воздействию ЭМП требуемой интенсивности и однородности подвергается не целиком объект испытаний, а только его фрагменты с приемниками электромагнитной энергии (электрические неоднородности, чувствительные элементы и т.п.). В том случае, когда для объекта испытаний неизвестно расположение фрагментов корпуса – приемников электромагнитной энергии, облучение поверхности объекта следует проводить путем последовательного перемещения антенны вдоль его корпуса с интервалом, соответствующим поперечному размеру рабочей области, формируемой антенной. Благодаря снижению требований к мощности установок-имитаторов метод локального облучения широко используется как в России, так и за рубежом.



Рис. 12. Рупорные антенны центра Alenia Aeronautica S.p.A.

Поскольку не для всех объектов испытаний удастся обосновать адекватность применения метода локального облучения, в 12 ЦНИИ Минобороны России ведутся также работы по созданию полеобразующих систем для испытаний крупногабаритных технических средств методом полного облучения. Расчеты показывают, что на частотах свыше 30 МГц при использовании антенной системы, в которой антенны возбуждаются сигналами одной частоты со сдвигом фазы, за счет подбора оптимальной разности фаз можно добиться трехкратного увеличения продольного размера рабочей области при сохранении однородного распределения компонент электрического поля [6].

Также в 12 ЦНИИ Минобороны России проводятся работы по расширению возможностей экспериментально-испытательной базы и созданию новых установок. Так, в 2021 г. запланирован ввод в эксплуатации мобильной установки, предназначенной для испытаний технических средств на восприимчивость к электромагнитным полям в диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц; при этом мощность ее усилителей достигнет 4 кВт.

Еще одним из новых методов воспроизведения действия гармонических электромагнитных полей высокой интенсивности является метод с использованием реверберационной камеры [7]. Камера представляет собой объемный закрытый резонатор со стенками из проводящего материала. Передающая антенна формирует поле, которое за счет многократного отражения от стенок камеры имеет сложное пространственное распределение. Используя дополнительные приспособления, получают большое количество вариантов распределения ЭМП на каждой частоте. Такое изменение распределения поля можно интерпретировать как изменение направления облучения объекта испытаний. Обычно реверберационные камеры используются приблизительно от 100 МГц [7]. Однако для камер с размерами, соответствующими размерам крупногабаритных технических средств, нижняя граничная частота составляет 30–40 МГц.

К достоинствам метода относятся:

- снижение требований к мощности источника гармонических ЭМП по сравнению с облучением в открытом пространстве;
- возможность оперативного получения предварительной оценки стойкости;
- отсутствие необходимости использования поворотных платформ;

- независимость результатов испытаний от применяемого оборудования и характеристик используемой камеры;
- снижение временных затрат при проведении испытаний.

К недостаткам метода относятся:

- сложность интерпретации результатов при возникновении отказов, связанная с отсутствием информации об ориентации объекта испытаний относительно векторов ЭМП;
- возможность неполного соответствия полученных данных результатам испытаний в безэховой камере, обусловленная трудностями калибровки испытательного воздействия.

За рубежом метод испытаний с использованием реверберационных камер широко используется. Например, в Магдебурге (Германия) построена камера высотой 3,5 м, шириной 6,5 м, длиной 8 м. Частотный диапазон камеры составляет 200 МГц – 11 ГГц, амплитуда поля – 300 В/м. Для изменения структуры поля использует один вертикально установленный тюнер. Внешний вид камеры представлен на рис. 13.



Рис. 13. Реверберационная камера в г. Магдебург

В английском испытательном центре QinetiQ CEO используется камера высотой 3 м, шириной 5 м, длиной 8 м. Частотный диапазон камеры составляет 100 МГц – 40 ГГц. Камера рассчитана на применение усилителей мощностью до 10 кВт. Внешний вид камеры представлен на рис. 14 [8].

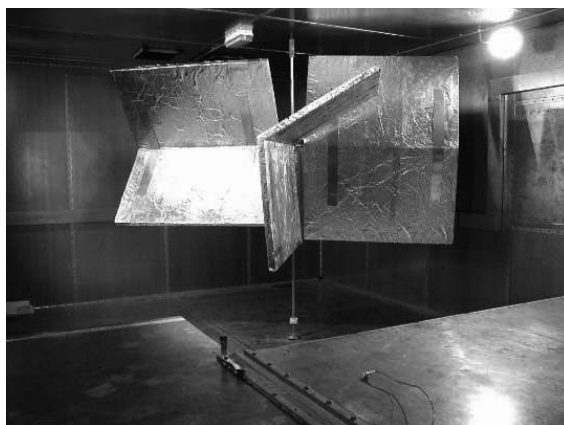


Рис. 14. Реверберационная камера центра QinetiQ CEO

В 12 ЦНИИ Минобороны России проводятся исследования по определению возможности использования реверберационных камер для испытаний технических средств на помехоустойчивость в условиях воздействия мощных гармонических электромагнитных полей [7], по результатам которых в ближайшей перспективе планируется создание макета установки.

Помимо представленных прямых методов воспроизведения воздействия электромагнитных полей РПС в ряде случаев применяют метод испытаний путем облучения внутренних объемов объектов испытаний электромагнитным полем с параметрами, определенными расчетно-экспериментальным путем [9]. Он состоит из следующих этапов. Сначала экспериментальным путем

определяется электромагнитная обстановка во внутренних отсеках испытуемого технического средства или коэффициент ослабления корпуса. Для этого объект испытаний облучается полностью полями с пониженным уровнем, но обязательно соответствующим динамическому диапазону измерителя поля и достаточным для измерения параметров внутреннего поля. Затем внутрь корпуса устанавливается оборудование для формирования гармонических ЭМП. Параметры поля выбираются с учетом коэффициента ослабления корпуса технического средства и требуемого уровня воздействующего поля.

Указанный метод может применяться в широком диапазоне частот. Он позволяет примерно на порядок снизить требования по мощности используемых усилителей. К достоинствам метода относится возможность одновременного нагружения всех кабельных линий объекта испытаний. Однако он имеет существенное ограничение, связанное с конечными размерами внутренних объемов объекта испытаний и характеристиками используемой при нагружении антенны, поскольку в том случае, если размеры отсека с учетом внутреннего заполнения оборудованием не позволяют поместить антенну внутрь, то метод не может быть реализован. Допускается использование метода облучения внутренних объемов, при котором в процессе облучения объекта испытаний измеряется не поле внутри корпуса, а токи, наведенные в оплетках кабельных линий.

Другим классом методов, позволяющим повысить эффективность использования энергетического ресурса источников гармонических ЭМП в диапазоне частот 1,5...300 МГц, являются косвенные методы. Косвенные методы могут быть реализованы путем пропуска тока по корпусу объекта испытаний или оплеткам кабельных линий [10].

Метод пропуска тока по корпусу может быть реализован только для изделий, корпус которых выполнен из проводящего материала. Обычно его рекомендуют к использованию в полосе частот от 1,5 МГц до частоты первого резонанса корпуса объекта испытаний (для крупногабаритных технических средств это обычно 5 - 20 МГц). Нагружение осуществляется в следующей последовательности. Первоначально расчётным или расчётно-экспериментальным путем определяют параметры тока, протекающего по корпусу объекта испытаний, при воздействии внешнего ЭМП. В случае экспериментального способа определения параметров нагружения испытываемый объект облучается полями на пониженных уровнях, соответствующих предельным техническим возможностям моделирующей установки. Одновременно измеряются параметры токов в корпусе и оплетках кабельных линий. Полученные амплитудные значения токов экстраполируют на заданные уровни ЭМП. Затем проводят нагружение путем пропуска тока с параметрами, соответствующими воздействию заданного ЭМП. При этом измеряются токи, наведенные в жгутах кабельных проводных, соединительных линий и фидерах АФУ, а также оценивается работоспособность аппаратуры, которая при проведении испытаний должна находиться во включённом состоянии. Достоинством метода является возможность одновременного нагружения всех кабельных линий объекта испытаний воздействием, эквивалентным воздействию полей заданного уровня.

К косвенным методам также относится метод пропуска тока по оплеткам кабельных линий. Обычно он применяется в диапазоне частот от 1,5 МГц до 200–400 МГц. Последовательность действий при реализации метода аналогична действиям при пропускании тока по корпусу объекта испытаний. Отличие заключается в том, что при облучении объекта измеряются токи, наведенные в каждом из жгутов кабельных проводных, соединительных линий и т.п. Затем на каждый жгут испытуемого оборудования устанавливаются инжектор для ввода тока и измерительный датчик. Испытательный сигнал последовательно подается на каждую цепь, в ходе нагружения измеряются параметры протекающего по оплетке тока, и оценивается работоспособность аппаратуры.

В 12 ЦНИИ Минобороны России проводятся исследования по определению возможности использования косвенных методов для испытаний технических средств на помехоустойчивость в условиях воздействия мощных гармонических электромагнитных полей [3].

Заключение

Таким образом, для проведения испытаний на действие мощных гармонических электромагнитных полей имеется широкий выбор методов воспроизведения воздействия и испытательных установок.

Российские испытательные базы хотя и уступают по оснащённости зарубежным организациям, но в основном обеспечены испытательным оборудованием, что позволяет проводить испытания на высоком научно-техническом уровне.

12 ЦНИИ Минобороны России является наиболее крупной и технически оснащенной базой для проведения испытаний технических средств на действие мощных электромагнитных полей высокой интенсивности и использует при этом разнообразные современные методы воспроизведения воздействия. Постоянно проводятся работы по модернизации и развитию экспериментально-испытательной базы, разрабатываются новые установки, проводятся исследования по совершенствованию методологии испытаний.

Список литературы

1. Варюхин Е.Г., Дубровин Е.А., Матюхевич С.Н., Сидорюк П.А., Стрыгин В.Г., Назаренко В.В., Смирнов В.Е. Нормативно-техническое обеспечение испытаний ракетного вооружения на действие электромагнитных полей радиотехнических средств и предложения по его совершенствованию. – Труды секции 22 XL Академических чтений по космонавтике. – Реутов: АО «ВПК «НПО машиностроения», 2016. – С. 251–261.
2. Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Пыж А.В. Особенности реализации прямого метода испытаний при оценке стойкости образца авиационной техники к воздействию электромагнитных полей метрового диапазона. – Труды XXXIV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Часть 7. – Серпухов: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2015. – С. 209–213.
3. Варюхин Е.Г., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н. Методы и средства испытаний технических средств на помехоустойчивость в условиях воздействия мощных радиочастотных электромагнитных полей. – Труды конференции «ТехноЭМС-2017». – М.: АО «НПФ «Диполь», 2017. – С. 31–35.
4. Акиншин И.В., Балюк Н.В., Жихарев В.М., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н., Сидорюк П.А., Ушанов Д.Н. Полосковая линия для испытаний технических систем на действие электромагнитных полей КВ-диапазона. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – №2(69). – С. 46–55.
5. Акиншин И.В., Бзыта В.И., Варюхин Е.Г., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н. Методы и средства испытаний вооружений и военной техники на действие электромагнитных полей радиотехнических средств. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №1(32). – С. 79–88.
6. Акиншин И.В., Балюк Н.В., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н., Пыж А.В., Ушанов Д.Н. Исследование способов формирования протяженных зон однородного электромагнитного поля с использованием вибраторных антенн. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – №1(68). – С. 17–29.
7. Дмитриева Н.Ю., Крохалев Д.И. Теоретическое исследование особенностей применения метода испытаний технических средств на помехоустойчивость с использованием реверберационных камер. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – № 3(58). – С. 38–50.
8. TR 61000-4-35. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-35: Testing and measurement techniques – HPEM simulator compendium.
9. STANAG 7116 AE (Edition 1) – Verification Methodology for the Electromagnetic Hardness of Aircraft. – NATO Standardization Agency, 20 October 2008.
10. Балюк Н.В., Давыдов А.А., Крохалев Д.И., Орлов С.Д. Расчетно-экспериментальные методы оценки соответствия технических средств заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2(65). – С. 7–21.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 2б.

Авторы

Акиншин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Балюк Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б; balyknwwa@mail.ru.

Жихарев Вячеслав Михайлович, старший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Крохалев Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Матюхевич Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Пыж Александр Викторович, старший инженер-испытатель ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Ушанов Дмитрий Николаевич, старший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Akinshin I.V., Balyuk N.V., Jikharev V.M., Krokhalev D.I., Matyukhevich S.N., Pyzh A.V., Ushanov D.N.

Approaches and Facilities for Testing Technical Means for Noise Immunity under Powerful Radio-Frequency Electromagnetic Fields

Abstract. In the paper, technical capabilities of the domestic and foreign test centers on generating of harmonic electromagnetic fields during tests of technical means containing radioelectronic equipment are analysed. The features of realization of various test methods on action of radiofrequency electromagnetic fields in view of the capabilities of existing test equipment are considered.

In Russia, the largest and most technically equipped base for tests of technical means on action of powerful electromagnetic fields is the test base of 12 Central research institute of the Ministry of Defence. In the institute, there is a wide choice of test methods and facilities that allows to perform the tests at high scientific and technical level. The works on modernization and development of test facilities, so as researches on improving test methodology, are permanently carrying out.

Key words: antenna, test method, noise immunity, radio aids, test facility, electromagnetic field

References

1. Varyukhin E.G., Dubrovin E.A., Matyukhevich S.N., Nazarenko V.V., Sidoryuk P.A., Smirnov V.E., Strygin V.G. Normativno-tekhnicheskoe obespechenie ispytaniy raketnogo vooruzheniya na deystvie elektromagnitnykh poley radiotekhnicheskikh sredstv i predlozheniya po ego sovershenstvovaniyu [Normative & Technical Support of Rocket Armament Tests to Action of Electromagnetic Fields of Radio Aids and Suggestions for Its Development]. *Trudy sekcii 22 XL Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike – Proc. Section 22 of XL Academic Readings on Cosmonautics*. Reutov, 2016, pp. 251–261. (In Russian)
2. Dubrovin E.A., Krokhalev D.I., Pyzh A.V. Osobennosti realizatsii pryamogo metoda ispytaniy pri otsenke stoykosti obraztsov aviatsionnoy tehniki k vozdeystviyu elektromagnitnykh poley metrovogo diapazona [The Peculiarities of Realization of Direct Test Method when Estimating Immunity of Aircraft Equipment to Action of Electromagnetic Fields of VHF Band]. *Trudy XXXIV Vserossiyskoy konferentsii «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funktsionirovaniya slozhnykh tehnikeskikh i informatsionnykh sistem» – Proc. of XXXIV All-Russian Conference «Problems of efficiency and operation safety of complicated technical and informational systems»*. Serpukhov, 2015, pp. 209–213. (In Russian)
3. Varyukhin E.G., Dubrovin E.A., Krokhalev D.I., Matyukhevich S.N. Metody i sredstva ispytaniy tekhnicheskikh sredstv na pomekhoustoychivost v usloviyakh vozdeystviya moschnykh radiochastotnykh elektromagnitnykh poley [Test Method and Facilities for Validation of Electronic Equipment Immunity to Power Radiofrequency Electromagnetic Fields]. *Trudy konferentsii «Tekhno-EMS 2017» – Proc. Conf. «Techno-EMS 2017»*. Moscow, 2017, pp. 31–35. (In Russian)

4. Akinshin I.V., Balyuk N.V., Zhikharev V.M., Krokhaliev D.I., Matyukhevich S.N., Sidoryuk P.A., Ushanov D.N. Strip Line for Testing Technical Systems on the Action of Electromagnetic Fields of HF band. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2019, no. 2 (69), pp. 46–55. (In Russian)
5. Akinshin I.V., Bzyta V.I., Varyukhin E.G., Dubrovin E.A., Krokhaliev D.I., Matyukhevich S.N. Test Methods and Facilities for Testing Arms and Military Equipment on Action of Electromagnetic Fields Generated by Radio Transmitters and Radars. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no. 1 (32), pp. 79–88. (In Russian)
6. Akinshin I.V., Balyuk N.V., Krokhaliev D.I., Matyukhevich S.N., Pyzh A.V., Ushanov D.N. The Study of Ways to Form Lengthy Areas of Uniform Electromagnetic Field Using Vibrator Antennas. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2019, no. 1 (68), pp. 17–29. (In Russian)
7. Dmitrieva N.Yu., Krokhaliev D.I. Teoreticheskoe issledovanie osobennostey primeneniya metoda ispytaniy tehnikeskikh sredstv na pomehoustoytschivost' s ispol'zovaniem reverberatsionnykh kamer [Some Aspects of Application of Approach to Testing Equipment for Immunity to Electromagnetic Fields Using Reverberation Chambers. Theoretical Study]. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2016, no. 3 (58), pp. 38–50. (In Russian)
8. TR 61000-4-35. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-35: Testing and measurement techniques – HPEM simulator compendium.
9. STANAG 7116 AE (Edition 1). Verification Methodology for the Electromagnetic Hardness of Aircraft. NATO Standardization Agency, 20 October 2008.
10. Balyuk N.V., Davydov A.A., Krokhaliev D.I., Orlov S.D. Computational-Experimental Methods for Evaluation of Electronic Equipment Agreement to Specified Requirements of Electromagnetic Immunity and Safety. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2 (65), pp. 7–21. (In Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Authors

Akinshin Igor V., candidate of engineering science, senior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Balyuk Nikolay V., doctor of engineering science, professor, chief scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation; e-mail: balyknwwa@mail.ru.

Zhikharev Vyacheslav M., senior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Krokhaliev Dmitry I., candidate of engineering science, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Matyukhevich Sergey N., candidate of engineering science, associate professor, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Pyzh Alexander V., senior test engineer, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Ushanov Dmitry N., senior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

УДК 537.868

**И.В. Акиншин, Д.И. Крохалев, С.Н. Матюхевич, А.В. Пыж,
П.А. Сидорюк, И.Д. Фисенко**

Научно-методическое обеспечение испытаний авиационной техники на действие электромагнитных полей метрового диапазона

Безопасность использования авиационной техники в условиях воздействия электромагнитных полей оценивается по результатам электромагнитных испытаний защищенности элементов ее бортовой кабельной сети. При этом не всегда обеспечивается облучение объекта испытаний с направления максимального воздействия. На основе результатов расчетных исследований диаграмм направленности сетей авиационной техники разработаны методы испытаний, позволяющие при минимальном количестве облучений образца обеспечить с заданной погрешностью максимальный эффект воздействия или количественно оценить возможное отличие результатов испытаний при облучении образца полем с направления максимального воздействия и при его облучении с нескольких фиксированных направлений, которые могут быть реализованы в ходе проведения испытаний.

Ключевые слова: авиационная техника, бортовая кабельная сеть, электромагнитное поле, диаграмма направленности, максимальный эффект воздействия

На всех этапах жизненного цикла авиационной техники должна обеспечиваться безопасность ее использования в условиях воздействия электромагнитных полей, которая во многом зависит от электромагнитной защищенности элементов бортовой кабельной сети.

Проблема оценки защищенности элементов бортовой кабельной сети летательных аппаратов в условиях воздействия электромагнитных полей всегда являлась актуальной и имела важное значение. В настоящее время актуальность этой проблемы многократно возросла в связи с использованием при разработке корпусов летательных аппаратов композитных материалов, влияющих на их экранирующие свойства, новой элементной базы и технологий при разработке элементов бортовой кабельной сети, а также в связи с разработкой и введением в строй новых радиотехнических средств, которые в отличие от существующих являются более мощными и работают в более широком диапазоне частот [1–5].

Безопасность использования авиационной техники в электромагнитных полях оценивают в ходе проведения государственных испытаний в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [6–9], в которых одним из основных требований является облучение объекта испытаний полем с направления, определяющего максимальный эффект воздействия. Поскольку, как правило, это направление заранее неизвестно, допускается облучать объекты испытаний с трех (спереди, сбоку и сзади) или с шести (дополнительно сверху и снизу) взаимно перпендикулярных направлений, если это позволяют условия проведения испытаний.

Однако при этом остается нерешенным вопрос, насколько отличаются результаты испытаний при облучении полем с направления, определяющего максимальный эффект воздействия, от результатов облучения образца полями с нескольких фиксированных направлений. Провести такую оценку можно по результатам исследования характеристик диаграмм направленности элементов кабельной сети образца авиационной техники, которые могут быть получены расчетным путем.

Для проведения расчетных исследований с помощью пакета прикладных программ ФЕКО [10] разрабатывается расчётная модель образца авиационной техники с необходимыми элементами бортовой кабельной сети, которая используется для определения их диаграмм направленности. В ходе последующих исследований рассчитанных диаграмм направленности элементов бортовой кабельной сети определяются направления облучения, для которых результат воздействия электромагнитного поля отличается от максимального с заданной погрешностью.

В качестве примера на рис. 1 приведена расчетная модель образца авиационной техники, построенная на основе его геометрических характеристик, с элементами бортовой кабельной сети, имитирующие цепи системы катапультирования и пожаротушения двигателей.



Рис. 1. Расчётная модель образца самолета (а) с элементами кабельной сети (б)

На рис. 2а показана рассчитанная диаграмма направленности цепи системы катапультирования на фиксированной частоте. Совокупность направлений, для которых ток, наведенный от действия внешних ЭМП, отличается от максимального не более чем на 3 дБ, образует некоторый телесный угол Ω (рис. 2б), значение которого может быть использовано для определения минимального количества направлений облучения объекта испытаний, гарантированно обеспечивающее эффект максимального воздействия с заданной погрешностью на выбранной частоте.



Рис. 2. Определения направлений падения поля, при которых обеспечивается близкое к максимальному воздействию на элемент кабельной сети

Одним из способов определения минимально необходимого количества облучений образца, при котором обеспечивается максимальное воздействие, является специально разработанный метод фиксированного шага по азимутальному углу φ и полярному углу θ .

Суть метода заключается в анализе конфигурации телесного угла Ω , определенного из диаграммы направленности конкретного элемента кабельной сети образца на фиксированных частотах в диапазоне от 30 до 300 МГц, с последующим выбором максимально возможного шага по углам φ и θ , обеспечивающего гарантированное попадание направления облучения образца в телесный угол Ω . Для выполнения этого условия максимально возможный шаг по углам φ и θ не должен превышать границы области направлений, для которых результат воздействия может отличаться от максимального не более чем на заданную величину.

Для образцов авиационной техники, содержащих несколько элементов кабельной сети, выбирается минимальный шаг по углам φ и θ в результате анализа диаграмм направленности всех элементов для каждой частоты исследуемого диапазона.

После определения указанным способом минимальных значений шага по зенитному и азимутальному углам количество направлений облучения образца для каждой частоты N определяется с помощью выведенного соотношения:

$$N = 2 + \sum_{i=1}^k \frac{360}{\Delta\varphi} \cdot \sin(i \cdot \Delta\theta), \quad (1)$$

где $k = \text{int}(180/\Delta\theta)$; $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ – минимальные значения шага по зенитному и азимутальному углам, соответственно.

Если для какого-то угла α число $360/\Delta\varphi \cdot \sin \alpha$ окажется дробным, то необходимо округлить его до большего целого числа.

В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость количества направлений облучения образца, гарантированно обеспечивающее эффект максимального воздействия с заданной погрешностью, от величины $\Delta\theta$ для некоторых значений $\Delta\varphi$, полученная с помощью соотношения (1).

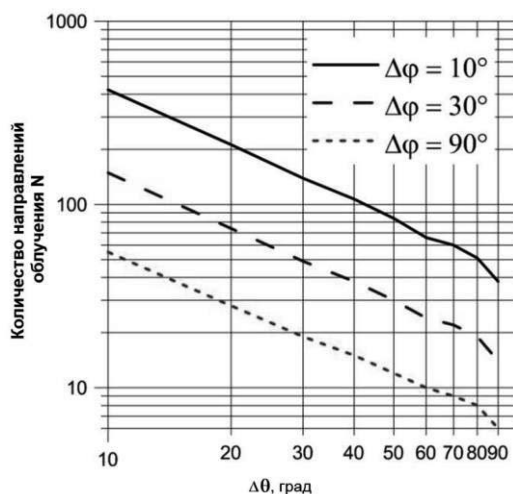


Рис. 3. Зависимость количества направлений облучения от величины шага по углам φ и θ

Следует отметить, что метод фиксированного шага по сферическим углам практически не применим в случае, когда телесный угол Ω имеет сложную произвольную форму, пример которой приведен на рис. 4.

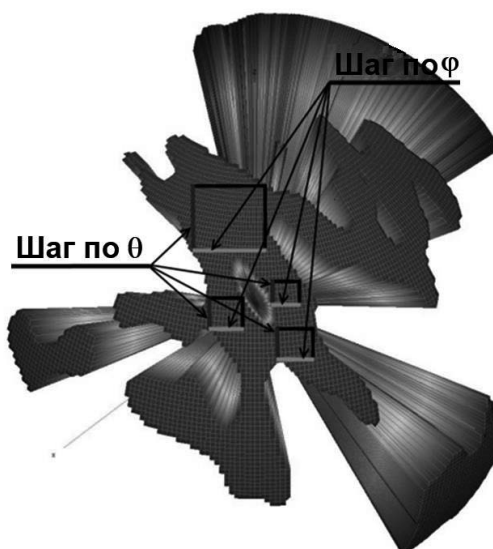


Рис. 4. Выбор шага по азимутальному углу φ и зенитному углу θ для телесного угла сложной формы

Несмотря на то, что совокупный телесный угол диаграммы направленности может быть достаточно большим, фиксированные шаги по пространственным углам φ и θ могут быть настолько малы, что это может привести к неприемлемо большому количеству облучений образца на каждой частоте. Например, если значение шага по углам $\varphi = \theta = 5^\circ$, то количество облучений образца на одной частоте составит $N = 1526$, что практически нереализуемо при проведении реальных испытаний.

В этом случае в качестве альтернативы может использоваться специально разработанный метод определения минимального количества облучений образца для определения эффекта максимального воздействия с заданной погрешностью, основанный на использовании суммарного значения телесного угла Ω_Σ .

Метод суммарного телесного угла базируется на гипотезе о том, что отношение суммарного телесного угла Ω_Σ к полному телесному углу равно вероятности P_1 того, что в элементе кабельной сети образца при действии электромагнитного поля со случайного направления наводится ток, отличающийся от максимально возможного значения с заданной погрешностью:

$$P_1 = \frac{\Omega_\Sigma}{4\pi}, \quad (2)$$

где P_1 – вероятность наводки тока в элементе кабельной сети, от действия ЭМП со случайного направления, отличающегося от максимально возможного не более чем на заданную величину; Ω_Σ – суммарный телесный угол.

Эта вероятность возрастает при увеличении количества вариантов облучения образца. Если направления облучения распределены по равномерному закону, то зависимость вероятности P от числа N воздействий поля с различных направлений можно определить с помощью соотношения (3):

$$P_1 = 1 - \left(1 - \frac{\Omega_\Sigma}{4\pi}\right)^N. \quad (3)$$

Исходя из этого, можно определить количество направлений облучения образца с условием, что доверительная вероятность погрешностей воздействующего поля в соответствии с требованиями действующих нормативных документов должна быть не менее 0,95, с помощью соотношения (4):

$$N = \log_{(1-P_1)}(1 - 0.95). \quad (4)$$

Если образец содержит несколько (k) элементов кабельной сети, то количество облучений определяется по формуле (5):

$$N = \log_{(1-P_1)}\left(1 - \sqrt[k]{0.95}\right). \quad (5)$$

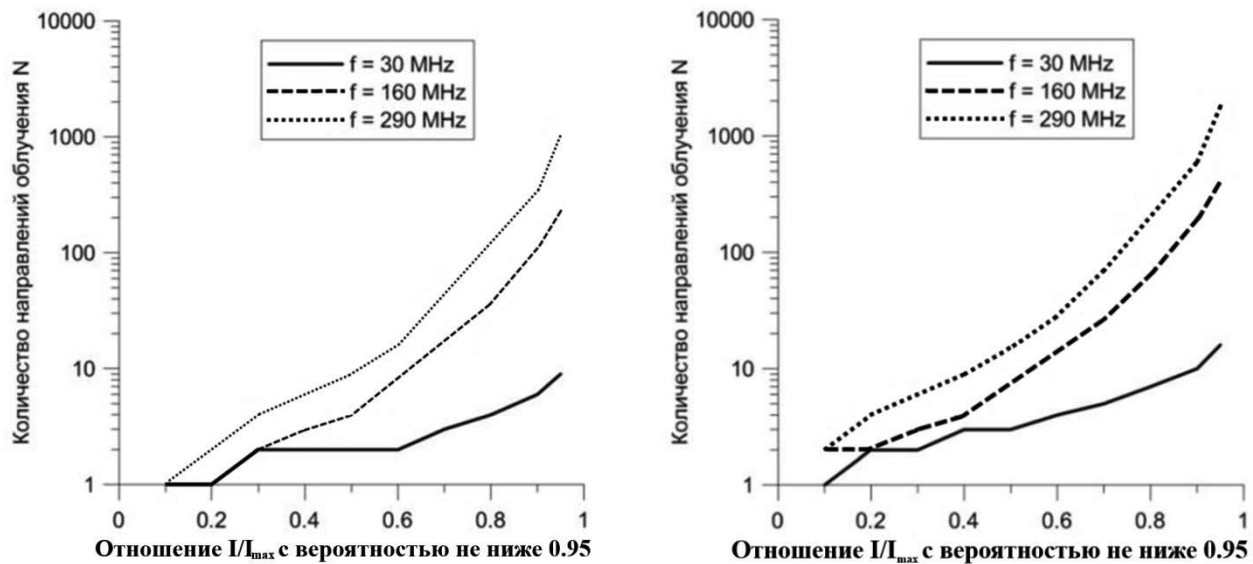
Для реализации метода суммарного телесного угла разработана специализированная вычислительная программа, которая позволяет обрабатывать рассчитанные диаграммы направленности, определять вероятность попадания случайного направления облучения образца в суммарный телесный угол Ω_Σ и рассчитывать минимальное количество направлений воздействия электромагнитного поля, распределённых случайно по равномерному закону распределения. Это количество направлений воздействия обеспечивает получение откликов элементов кабельной сети, отличающихся от максимальных не более чем на заданную величину, с вероятностью не менее 0,95. В качестве критерия отличия максимального наведенного тока от допустимого при облучении образца со случайного направления используется отношение I/I_{max} , где I_{max} – ток, наведенный при облучении образца с направления максимального воздействия, I – ток, отличающийся от I_{max} не более чем на заданную величину.

На рис. 5 приведена зависимость минимального количества направлений облучений образца со случайных направлений N от величины критерия отличия I/I_{max} и от количества элементов кабельной сети.

Анализ полученных зависимостей показывает, что для обеспечения эффекта максимального воздействия, когда величина критерия отличия максимального наведенного тока от допустимого при облучении образца со случайного направления стремится к единице, требуется большее количество нагружений со случайного направления – от 10 до 1000 для частот 30 МГц и 290 МГц, соответственно. Кроме того, количество облучений образца со случайного направления дополнительно увеличивается с ростом числа исследуемых элементов кабельной сети. Для получения при проведении испытаний в элементе кабельной сети тока, отличающегося от максимального не более чем на 3 дБ, может потребоваться несколько десятков направлений облучения, что очень сложно реализуемо с практиче-

ской точки зрения. В то же время, для получения наведенного тока, отличающегося от максимального не более 2-х раз (6 дБ), количество направлений облучения, как правило, не превосходит десяти.

Таким образом, разработанный метод суммарного телесного угла позволяет определить минимальное количество облучений образца с большим количеством элементов кабельной сети с различных направлений для определения эффекта максимального воздействия с заданной погрешностью.



а) для одного элемента КС

б) для десяти элементов КС

Рис. 5. Зависимость N от отношения I/I_{\max} для разного количества элементов кабельной сети

Следует отметить, что существующие средства испытаний не всегда позволяют облучать объект испытаний с произвольного направления. Кроме этого, количество направлений облучения может оказаться неприемлемо большим (несколько десятков или даже сотен). В этом случае требуется оценить величину, на которую могут отличаться результаты испытаний, полученные при облучении образца с фиксированного (технически реализуемого) количества направлений от результатов максимального эффекта воздействия. Такую оценку позволяет провести специально разработанный метод фиксированного количества направлений облучения объекта испытаний.

Суть метода заключается в том, чтобы найти телесный угол, вероятность попадания в который вектора Пойнтинга внешнего электромагнитного поля не ниже 0,95, при облучении объекта испытаний с N случайных направлений. Данный телесный угол определяется с помощью соотношения, полученного из выражения (5):

$$\Omega_{N\Sigma} = 4\pi \cdot \left(1 - \sqrt[N]{1 - k\sqrt{0.95}}\right). \quad (6)$$

где N – количество случайных вариантов облучения объекта испытаний, $\Omega_{N\Sigma}$ – совокупный телесный угол, вероятность попадания в который не менее 0,95 при облучении объекта с указанных направлений, k – количество элементов кабельной сети объекта испытаний.

Для реализации этого метода разработана вычислительная программа, которая для каждой предварительно рассчитанной диаграммы направленности элемента кабельной сети определяет однозначную связь между телесным углом $\Omega_{N\Sigma}$ и тем, во сколько раз ток, наведенный в этом элементе при попадании вектора Пойнтинга в указанный телесный угол, будет отличаться от максимального наведенного тока.

Разработанный метод фиксированного количества направлений облучения позволяет рассчитать величину, на которую с вероятностью 0,95 отличаются результаты испытаний для фиксированного количества облучений от случая, когда вектор Пойнтинга действует с направления, соответствующего максимуму диаграммы направленности элемента кабельной сети. Этот метод позволяет повысить достоверность результатов испытаний в тех случаях, когда имеющиеся средства испытаний не позволяют облучить образец с требуемого количества направлений.

Таким образом, в ходе проведенных исследований разработан научно-методический аппарат, позволяющий определить направление электромагнитного облучения объекта испытаний, при котором реализуется максимальный эффект воздействия, с использованием предварительно рассчитанных диаграмм направленности его элементов кабельных сетей, а также оценить минимально необходимое количество облучений при испытаниях образца для достижения эффекта максимального воздействия с заданной погрешностью. Кроме этого, разработанный аппарат позволяет количественно оценить отличия в результатах испытаний, полученных для случая облучения образца полем с направления максимального воздействия и при его облучении с произвольно выбранных направлений.

Список литературы

1. Сенюшкин Н.С., Ямалиев Р.Р., Ялчибаева Р.Р. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА. – Молодой учёный. – 2011. – №4, т.1. – С. 59–61.
2. Федосов Е., Косьянчук В., Сельвесюк Н. Интегрированная модульная авионика. – Радиоэлектронные технологии. – 2015. – № 1. – С. 66–71.
3. Анцев Г., Киселёв А., Сарычев В. Авионика: регулировщик воздушного движения. – Наука и жизнь. – 2004. – №2. Доступна на <https://m.nkj.ru/archive/articles/4762/> (доступ 5 марта 2019 г.).
4. Анцев Г., Киселёв А., Сарычев В. Авионика – всё видящее. – Наука и жизнь. – 2017. – № 1. Доступна на <https://m.nkj.ru/archive/articles/3628/> (доступ 5 марта 2019 г.).
5. Анисимов А. В., Бурутин А. Г. Проблемы и направления совершенствования системы обеспечения электромагнитной стойкости авиационной техники. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 1 (32). – С. 28–32.
6. ГОСТ 30804.4.3-2013. Межгосударственный стандарт. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. – Москва, Стандартинформ, 2014. – 48 с.
7. ГОСТ Р 51317.4.3-2006 (МЭК 61000-4-3:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. – Москва, Стандартинформ, 2007. – 23 с.
8. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – № 4 (51). – С. 5–17.
9. Балюк Н.В., Давыдов А.А., Крохалёв Д.И., Орлов С.Д. Расчётно-экспериментальные методы оценки соответствия технических средств заданным требованиям электромагнитной стойкости и безопасности. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2 (65). – С. 7–21.
10. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием ФЕКО. – Москва, СОЛОН-Пресс, 2019. – 410 с.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 26.

Авторы

Акиншин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 26.

Крохалев Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 26.

Матюхевич Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 26.

Пыж Александр Викторович, старший инженер-испытатель ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 26.

Сидорюк Павел Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Фисенко Иван Дмитриевич, начальник лаборатории ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Akinshin I.V., Krokhaliev D.I., Matyukhevich S.N., Pyzh A.V., Sidoryuk P.A., Fisenko I.D.

Methodological Support for the Tests of Aeronautic Engineering on the Action of Electromagnetic Fields of VHF Range

Abstract. Safety of use of aeronautic engineering under electromagnetic fields is estimated in accordance with results of electromagnetic tests on immunity of elements of its onboard cable network. Meanwhile the exposure of object under test from a direction of maximal excitation is not always provided. On the base of results of analysis of radiation patterns of the elements of cable networks of airplanes, the test methods are elaborated, which allow by smallest number of the exposures of object under test to provide (with specified error) the maximal effect of exposition, or to evaluate possible difference of tests results when acting from the direction of maximal effect from the same when acting from a few fixed directions available through the tests.

Key words: aeronautic engineering, onboard cable network, electromagnetic field, radiation pattern, maximal effect of exposition

References

1. Senyushkin N.S., Yamaliev R.R., Yalchibaeva R.R. Primenenie kompozicionnykh materialov v konstrukcii BPLA [The use of composites in design of UAVs]. *Molodoy uchyonyy – Young scientist*, 2011, no.4, vol. 1, pp. 59–61. (In Russian)
2. Fedosov E., Kos'yanchuk V., Sel'vesyuk N. Integrirovannaya modul'naya avionika [The integrated modular avionics]. *Radioelektronnye tekhnologii – Radioelectronic technologies*, 2015, no.1, pp. 66–71.
3. Antsev G., Kiselyov A., Sarychev V. Avionika: regulirovshchik vozdušnogo dvizheniya [Avionics: the traffic controller of air movement]. *Nauka i jizn' – Science and life*, 2004, no.2. (In Russian). Accessible at <https://m.nkj.ru/archive/articles/4762/> (access at March 5, 2019).
4. Antsev G., Kiselyov A., Sarychev V. Avionika: vsyo vidyashee [Avionics: all seeing]. *Nauka i jizn' – Science and life*, 2017, no.1. (In Russian). Accessible at <https://m.nkj.ru/archive/articles/3628/> (access at March 5, 2019).
5. Anisimov A.V., Burutin A.G. Problems and directions of improvement of the support system of electromagnetic immunity of aviation technics. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestivosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no.1 (32), pp. 28–32. (in Russian)
6. Interstate Standard GOST 30804.4.3-2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity. Requirements and test methods. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 48 p. (In Russian)
7. State Standard GOST R 51317.4.3-2006. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity. Requirements and test methods. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 23 p. (In Russian)
8. Kechiev L.N., Balyuk N.V. The requirements of foreign standards on immunity and safety of objects to high-power electromagnetic effects. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestivosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2014, no.4 (51), pp. 5–17. (in Russian)
9. Balyuk N.V., Davydov A.A., Krokhaliev D.I., Orlov S.D. Computational-Experimental Methods for Evaluation of Electronic Equipment Agreement to Specified Requirements of Electromagnetic Immunity and Safety. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestivosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no.2 (65), pp. 7–21. (in Russian)
10. Bankov S.E., Griбанov A.N., Kurushin A.A. *Elektrodinamicheskoe modelirovanie antenykh i SVCh struktur s ispol'zovaniem FEKO* [Electrodynamic modelling of antenna and microwave structures with the use of FEKO], Moscow, SOLON-Press Publ., 2019, 410 p. (in Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Authors

Akinshin Igor V., candidate of engineering science, senior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Krokhalev Dmitry I., candidate of engineering science, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Matyukhevich Sergey N., candidate of engineering science, associate professor, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Pyzh Alexander V., senior test engineer, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Sidoryuk Pavel A., candidate of engineering science, associate professor, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Fisenko Ivan D., chief of the laboratory, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

УДК 621.316

**Е.В. Агапов, А.О. Заруцкий, И.И. Зеленский, Д.Б. Красноперов,
В.В. Оленевский, А.Ю. Пашков, В.А. Плыгач, Г.В. Самсонов**

Методы и средства воспроизведения воздействия импульсных электромагнитных полей и токов молнии на экспериментально-испытательной базе 12 ЦНИИ

В статье рассматриваются проблемы проведения испытаний крупногабаритных объектов ВВТ на действие ЭМИ. Освещены традиционные и перспективные способы воспроизведения испытательного воздействия - полномасштабное и локальное облучение, а также нагружение аппаратуры образцов ВВТ поблочно. Приведено краткое описание и характеристики установок-имитаторов, особенности их функционирования и области применения. Исследованы возможности экспериментально-испытательной базы ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России по воспроизведению воздействия токов молниевых разрядов, определены направления ее дальнейшего развития.

Ключевые слова: электромагнитное поле, ток молнии, имитатор, полеобразующая система, шунтирующий разрядник, генератор тока и напряжения

1. Методы подтверждения требований стойкости к действию электромагнитного импульса при испытаниях крупногабаритных объектов

Одним из основных требований, предъявляемых к современным ракетным комплексам и ракетно-космическим системам, является обеспечение устойчивого, бесбойного и безаварийного функционирования в условиях воздействия электромагнитных полей и токов различного происхождения.

Все многообразие импульсных электромагнитных факторов (ЭМФ), которые могут действовать на сложные технические системы, в том числе на ответственных этапах их эксплуатации и которые способны привести к сбоям и отказам их аппаратуры, можно условно разделить на:

1. ЭМФ, опасность которых заключается в больших амплитудах и малых временах их нарастания, что обуславливает высокую проникающую способность и неспособность своевременного срабатывания защитных устройств. К таким факторам, прежде всего, относится электромагнитный импульс ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ).

2. ЭМФ, поражающее действие которых основано на больших величинах переносимых зарядов и выделившейся на чувствительных элементах энергии. К ним можно отнести токи молнии, электромагнитные поля радиопередающих средств и радиолокационных станций.

Опасность действия на радиоэлектронную аппаратуру ЭМИ ЯВ обуславливается еще и тем, что размеры источника опасных для техники полей достигает сотен километров.

В соответствии с требованиями действующих и перспективных нормативных документов оценка стойкости образцов вооружения к воздействию ЭМИ ЯВ осуществляется только экспериментальными или расчетно-экспериментальными методами, т.е. в ходе испытаний.

Поскольку проведение натуральных испытаний невозможно, для моделирования действия ЭМИ используются имитаторы импульсных электромагнитных полей.

Наиболее представительной экспериментально-испытательной базой (ЭИБ) ЭМИ в нашей стране по составу имитаторов и номенклатуре воспроизводимых воздействий является база ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России. Установки-имитаторы ЭИБ 12 ЦНИИ для проведения испытаний сложных технических систем на действие ЭМИ имеются в мобильном варианте, что позволяет проводить испытания в местах дислокации объектов испытаний.

До настоящего времени развитие ЭИБ ЭМИ шло по пути создания крупногабаритных имитаторов, воспроизводящих испытательное воздействие, максимально приближенное к требованиям НТД. С точки зрения принципов формирования импульсного электромагнитного поля в рабочем объ-

еме моделирующие установки ЭМИ делятся на имитаторы связанных волн, где поле формируется между электродами полеобразующей системы, и имитаторы излучающего типа, рабочий объем которых размещается за пределами полеобразующей системы. В качестве примера на рис. 1 представлен внешний вид имитаторов ЭРУ-2М и СЭМИ.

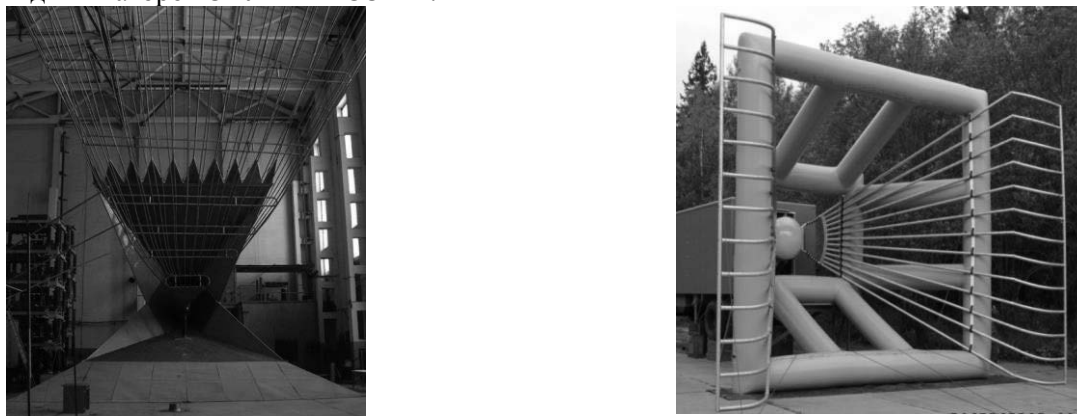


Рис. 1. Имитаторы ЭМИ связанных волн ЭРУ-2М (слева) и излучающего типа «СЭМИ» (справа)

Главное отличие воспроизводимого с помощью имитаторов испытательного воздействия от реального ЭМИ заключается в размерах пространства, где создаются импульсные поля (единицы – десятки метров).

Возможности имитаторов ЭМИ связанных волн по испытаниям крупногабаритных объектов четко ограничены размерами их рабочих объемов, за пределами которых амплитуды воспроизводимых полей резко падают. На рис. 2 представлены размеры источников ЭМИ высотного ядерного взрыва в реальном масштабе и график изменения амплитуды воспроизводимого имитатором излучающего типа с удалением от излучателя.

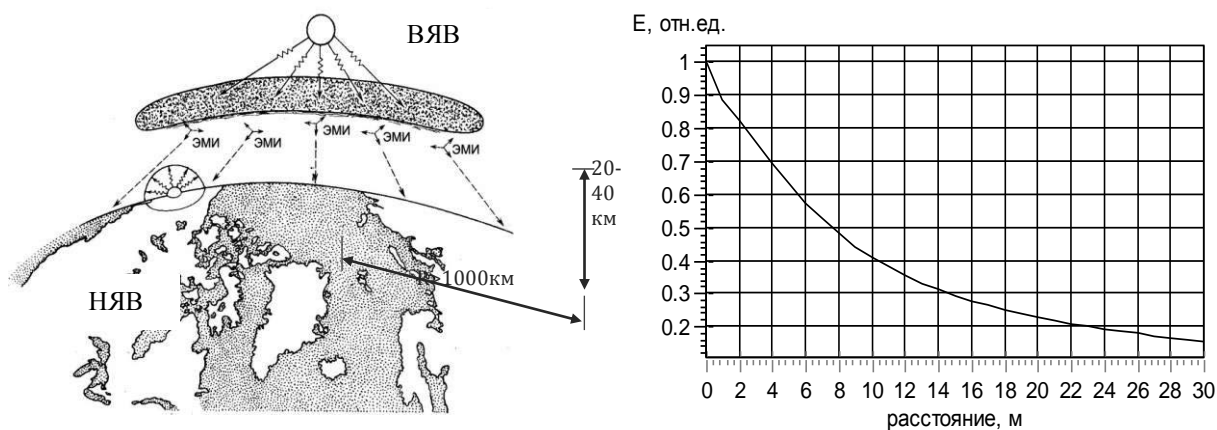


Рис. 2. Размеры источника ЭМИ высотного ядерного взрыва (слева) и распределение амплитуды поля имитатора ЭМИ излучающего типа (справа)

Имитаторы излучающего типа формируют плоскую волну ЭМИ. И хотя амплитуда воспроизводимого поля при удалении от излучателя падает быстро, ее изменение не имеет резких скачков. Так, размеры испытательного объема имитатора «Артерит» составляют 40 × 11 метров, что позволяет исследовать воздействие ЭМИ ЯВ на объекты соответствующей длины и вытянутой формы. Однако, ряд объектов испытаний, прежде всего, самолеты, фортификационные сооружения, комплексы управления и связи имеют размеры десятки и сотни метров.

При испытаниях крупногабаритных объектов с помощью имитаторов излучающего типа используются следующие способы:

1. Локальное облучение, когда испытательное воздействие воспроизводится на часть объекта испытаний, длина которой соответствует длине излучающей плоскости имитатора.

2. Воспроизведение испытательного воздействия поблочно, на отдельные приборы и узлы аппаратуры, причем параметры воздействия соответствуют случаю штатного размещения аппаратуры в объектах испытаний с учетом экранирующих свойств корпусов и влияния кабельных линий, соединяющих ее с другими элементами испытываемой системы.

В настоящее время основным условием применимости способа локального облучения является независимость реакции на испытательное воздействие различных пространственно разнесенных систем объекта. [1]. Необходимо обеспечить поочередное нагружение всех частей объекта испытаний с учетом их взаимных связей, то есть воспроизвести напряжения и токи на концах кабельных линий. Как правило, аппаратура объектов испытаний сконструирована в отсеках и блоках, размеры которых соответствуют размерам рабочих объемов имитаторов. В то же время длины кабельных линий могут быть в разы больше. Схемы воспроизведения воздействия ЭМИ способом локального облучения и модельной задачи по расчету токов и напряжений в кабельных линиях представлены на рис. 3.

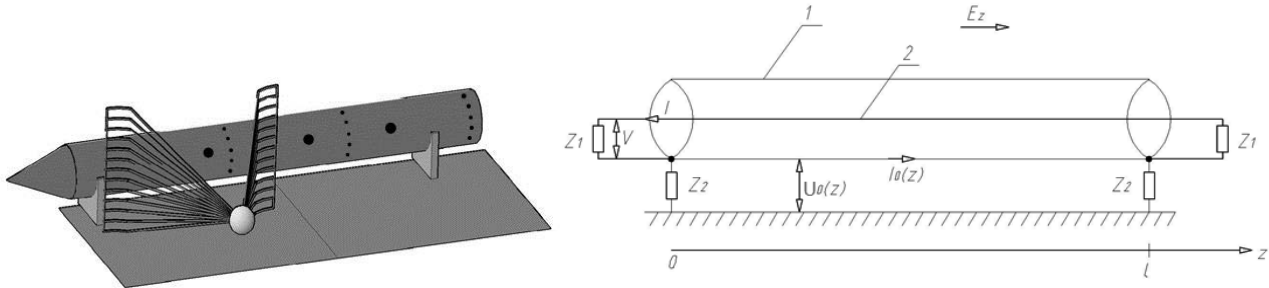


Рис. 3. Схема воспроизведения воздействия ЭМИ способом локального облучения

Токи в экранах кабелей носят колебательный характер на резонансной и кратных ей частотах. Распределение тока по длине экрана кабеля (вдоль оси z в принятой на рис. 3 системе координат) при полномасштабном облучении описывается формулой [2]:

$$I_0(z) = -j \frac{E_z}{Z_в \beta} \cdot \frac{2 \sin \frac{\beta z}{2} \sin \frac{\beta(l-z)}{2}}{\cos \frac{\beta l}{2}}, \quad (1)$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление кабеля; E_z – амплитуда воздействующего поля; l – длина кабеля.

Из данной формулы следует, что условием резонанса тока является равенство нулю знаменателя:

$$\begin{aligned} \cos \frac{\beta l}{2} &= 0, \\ \beta &= \frac{\pi(1+2k)}{l}, k = 1, 2, 3, \dots, \\ \beta &= \frac{2\pi f}{c}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для кабельной линии резонансная частота будет определяться соотношением:

$$f = \frac{c(1+2k)}{2l}.$$

Аналогичные выводы можно сделать для напряжения экрана кабеля относительно близлежащей проводящей поверхности:

$$U_0(z) = \frac{E_z}{\beta} \cdot \frac{\sin \beta \left(z - \frac{l}{2} \right)}{\cos \frac{\beta l}{2}}. \quad (3)$$

Условие резонанса сохраняется.

При локальном облучении, когда электромагнитное поле воздействует только на часть кабеля, от точки его подключения к объекту испытаний ($z = 0$) до некоторой длины ($z = n$) распределение ток и напряжения меняется:

$$I_0(z) = -j \frac{E_z}{Z_в \beta} \cdot \frac{\sin^2 \beta \frac{n}{2} \sin \beta z}{\sin \frac{\beta l}{2} \cos \frac{\beta l}{2}}, \quad (4)$$

$$U_0(z) = \frac{E_z}{\beta} \cdot \frac{\sin^2 \beta \frac{n}{2} \cos \frac{\beta l}{2}}{\sin \frac{\beta l}{2} \cos \frac{\beta l}{2}}. \quad (5)$$

Меняется также и условие резонанса:

$$\beta l = \pi(1 + 2k) \cup \beta l = 2\pi k, k \in Z.$$

Из приведенных формул видно, что количество частот, кратных резонансной увеличивается по сравнению со случаем полномасштабного нагружения вдвое.

Ток по экрану кабеля является источником формирования соответственно напряжения между жилой и экраном и тока в жиле, которые непосредственно действуют на аппаратуру объекта испытаний.

Расчеты показывают, что появление дополнительных частот тока и нормального поля при локальном облучении позволяет скомпенсировать уменьшение внутренних напряжения и тока на резонансной частоте. Методика расчета необходимой облучаемой длины кабеля для обеспечения заданной достоверности испытаний крупногабаритных объектов испытаний разработана в 12 ЦНИИ.

В то же время следует отметить, что способ локального облучения расширяет возможности экспериментально-испытательной базы ЭМИ, но не решает проблему испытаний «площадных» и крупногабаритных авиационных объектов.

Испытания отдельных приборов и узлов поблочно могут быть реализованы при наличии соответствующей системы требований. Очевидно, что эти требования будут принципиально мягче, чем к объектам в целом, т. е. их легче воспроизвести. В то же время за счет частотной избирательности цепей и широкого многообразия их размеров и способов прокладки сигналы, действующие на одни и те же блоки, будут весьма многообразны. Поэтому имеет место сложная научная задача обобщения реакций объектов и преобразования их в систему минимально необходимых параметров токов и напряжений, а также и полей, стойкость к которым аппаратуры должна быть подтверждена.

На отдельные блоки или приборы, входящие в состав крупных технических систем, непосредственно действуют одновременно поля, проникшие сквозь внешние экраны, а также токи и напряжения в подключенных кабельных линиях. Очевидно, что воспроизвести их одновременно с помощью испытательных установок не представляется возможным. В то же время, наиболее вероятно, что только один из этих факторов определяет стойкость аппаратуры в каждом конкретном случае, поэтому поля, токи и напряжения могут воспроизводиться поочередно.

Кроме того, исследования показывают, что распределение полей внутри крупногабаритных экранированных объектов (таких как самолет) при воздействии на них полей имитаторов или плоской электромагнитной волны примерно одинаково и, что особенно важно, равномерно. Если учесть, что оборудование самолетов размещено в экранированных в той или иной степени и изолированных друг от друга отсеках, задача задания требований по стойкости облегчается. Они могут быть разделены на несколько степеней жесткости.

Непременным условием продолжения исследований в данном направлении является наличие средств измерений токов, напряжений, внутренних электромагнитных полей, методов расчета соответствующих величин. Дальнейшее развитие системы оценки соответствия крупногабаритных технических систем требованиям электромагнитной стойкости должно идти по пути разработки комплекса требований к аппаратуре этих систем и методов их экспериментальной проверки.

2. Возможности экспериментально-испытательной базы по воспроизведению токов молниевых разрядов

Современные объекты военной техники, оснащенные радиоэлектронными устройствами и системами, могут быть выведены из строя как в военное, так и в мирное время при воздействии на них электромагнитных помех различного происхождения. Особую опасность представляют мощные импульсные токи, возникающие при разряде молний [3, 4].

Каждые сутки на земном шаре гремят в среднем 45 тысяч гроз, каждую секунду в земную поверхность ударяет примерно 100 молний, относящиеся, как правило, к линейным молниям между облаком и землей [5]. Эти молнии являются причиной поражением людей, лесных пожаров, нарушении работы энергосистем и систем связи, сбоев в работе радиоэлектронной аппаратуры, авиакатастроф и других бедствий [6]. Так, в мае 2019 года в результате попадания молнии произошла катастрофа гражданского лайнера СУПЕР ДЖЕТ-100, в результате чего погиб 41 пассажир [7, 8].

Молния наносит поражение, имеющее комплексный характер, который заключается в одновременном проявлении электромагнитного, термического, электродинамического и электрогидравлического эффекта.

Электромагнитный эффект прямого удара молнии носит комплексный характер, заключающийся в одновременном проявлении следующих физических явлений:

- заноса высокого потенциала;
- активного и индуктивного падений напряжений на пораженном объекте;
- наведение в цепях объекта токов и напряжений.

Значение заносимого потенциала и активного падения напряжения U_A прямо пропорциональны амплитуде тока молнии I и активному сопротивлению R_A соответствующих пораженных цепей ($U_A = R_A \cdot I$). Индуктивное падение напряжения прямо пропорционально индуктивности L испытуемого объекта и скорости изменения во времени тока молнии:

$$U_{ind} = L \cdot di/dt \quad (6)$$

Уровень наводимых токов и напряжений также в основном определяется крутизной фронта импульса тока.

Термический эффект проявляется в разогреве пораженного объекта или его частей (проводников), по которым протекает ток молнии. Он наиболее опасен при контакте высокотемпературного канала молнии с горючими материалами. Повышение температуры пораженной части объекта можно оценить по формуле

$$\Delta T = \frac{\delta \cdot A_3}{\chi \cdot \eta \cdot d^2} \quad (7)$$

где δ , η , χ – удельное сопротивление, плотность и теплоемкость объекта (его пораженной части) соответственно; d – площадь поперечного сечения пораженной части объекта; A_3 – интеграл энергии, определяемый как

$$A_3 = \int_0^{\infty} I^2(t) dt, A^2 c.$$

Таким образом, уровень термического воздействия молнии прямо пропорционален интегралу ее энергии, который зависит от количества электричества Q , переносимого вспышкой молнии. При испытаниях Q может легко рассчитываться и контролироваться [9].

Термический эффект обусловлен в основном стадией непрерывного тока. В главной стадии, несмотря на большую амплитуду тока, этот эффект проявляется значительно меньше, так как сильная ударная волна срывает пламя и сдувает продукты горения [10].

Электродинамический эффект прямого удара молнии обусловлен:

- ударной волной, которая возникает в результате резкого повышения давления газа в ее канале;
- электродинамическими усилиями, возникающими при взаимодействии токов в канале молнии и пораженном объекте.

Опасность электродинамического эффекта определяется теми же параметрами молнии и значительно ниже термического и электромагнитного. Однако он может принести большой вред при наличии в объекте воздействия выступающих тонких металлических предметов (датчиков давления, антенн и т.п.).

Электрогидравлический эффект опасен при наличии в объекте воздействия композиционных материалов, которые в последнее время нашли широкое применение. Эффект заключается в том, что под действием тока молнии тонкие металлические детали, входящие в состав композитного материала (металлические пленки, сетки) испаряются. Возникающие при этом дуговые каналы контактируют с пластиком, который разлагается и выделяет газ. В результате образуются ударные волны, которые расщепляют и вспучивают стенку из композитного материала.

Этот эффект наблюдается как в кабельных, так и оптоволоконных линиях. При ударе молнии в землю поблизости от проложенного в земле кабеля с металлическими элементами в конструкции часть тока проникает в кабель и распространяется по его элементам (броню, металлической оболочке, медным жилам). В то же самое время возможно внезапное испарение воды в объеме дуги к кабелю от точки удара молнии. Давление паров воды может достигать сотен атмосфер и привести к повреждению кабеля еще до завершения процесса распространения тока по кабелю.

При распространении тока молнии по кабелю возникает разница потенциалов между жилами, броней и землей вследствие разницы параметров распространения цепей жила-земля и броня-земля, и

становятся возможными пробой изоляции в точках, удаленных от точки попадания тока в кабель. При этом возможно повреждение расположенных рядом оптических волокон. Если амплитуда составляет десятки килоампер, то возможно расплавление металлических элементов.

Возникающие электромагнитные поля молнии могут привести к сбоям в передачи информации по оптоволоконным кабелям вследствие поворота плоскости поляризации, передаваемой по кабелям световой волны.

Для проведения испытаний ВВТ на действие тока молнии в 12 ЦНИИ Минобороны России используются как стационарные, так и мобильные генераторы импульсных токов и напряжений (ГИН и ГИТ) комплекса транспортабельных генераторов «Зенит» («Зенит-А», «Зенит-К», моделирующий комплекс для воспроизведения трехкомпонентного тока молнии «Зенит-Р» и транспортабельный генератор импульсного напряжения ГИН-300) и стационарные генераторы ГИН-6000 и ГИТ-1,2,3. Транспортабельность установок позволяет производить испытания крупногабаритных объектов в местах их постоянной дислокации. Генератор ГИН-6000, с выходным напряжением до 6 МВ, используется для определения точек вероятного попадания молнии в объект испытания. В эти точки, в дальнейшем предполагается инъекция тока.

Характеристики установок-имитаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

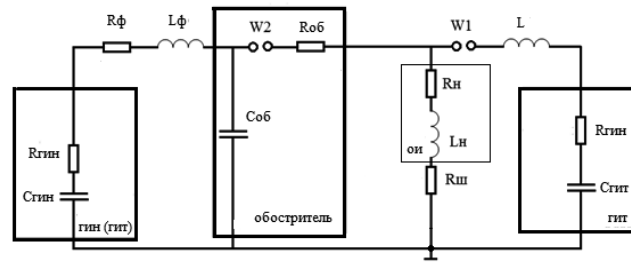
Характеристики установок-имитаторов

Характеристики	Зенит-Р	Транспортабельный ГИН-300	ГИН (Зенит-А)	ГИТ (Зенит-К)	ГИТ с обострит. (Зенит-К)	ГИН-6000	ГИТ-1,2,3
Емкость в ударе C , мкФ	4,2	4	0,067	60	5,3	0,053	7,2–3280
Выходное напряжение U , кВ	250	280	600	50	300	6000	4,2–175
Воспроизводимый ток I , кА	130	55	10	30	до 60		200
Длительность фронта импульса тока t_f , мкс	3	2,5	0,03	30	2		5
Длительность импульса тока t_n , мкс	100	15	0,1	150	100		50–1000

Для воспроизведения импульсов тока с необходимыми временными параметрами предлагается способ, основанный на совместном использовании нескольких генераторов ГИТ и ГИН. При этом каждый генератор формирует часть испытательного импульса тока [11].

Воспроизведение импульсных токов с помощью нескольких генераторов осуществляется следующим образом. С помощью имитатора напряжений ГИН через корпус объекта испытаний, формируется импульс тока с требуемыми длительностью фронта импульса тока t_f и амплитудой тока I . Работающий на этот же объект ГИТ обеспечивает необходимую длительность импульса тока t_n и переносимый заряд Q . Синхронизация срабатываний генераторов напряжения и тока осуществляется с помощью устройства синхронизации импульсов, как правило, состоящего из линии задержки и специально настроенного разрядника генератора тока. В каждом конкретном случае параметры устройства синхронизации определяются при отработке схем нагружения расчетно-экспериментальным путем.

Когда собственная индуктивность объекта испытаний L_n составляет значительную часть разрядного контура (более 6–10 мкГн) происходит увеличение фронта воспроизводимого импульса тока t_f . Одним из вариантов уменьшения фронта импульса тока является применение емкостного обострителя, который разряжается через воздушный промежуток на объект испытаний. Типовая схема подключения генераторов (с использованием емкостного обострителя) к объекту испытаний (ОИ) представлена на рис. 4. Емкостной обостритель в данном случае работает по принципу импульсной зарядки от генератора импульсных напряжений (ГИН) с последующей его разрядкой через воздушный промежуток на объект испытаний.



ОИ – объект испытаний; R_{ϕ} , L_{ϕ} – формирующие элементы схемы; $W1$, $W2$ – управляемые разрядники; L – защитная индуктивность; $R_{ш}$ – токоизмерительный шунт

Рис. 4. Схема подключения генераторов к объекту испытаний с использованием емкостного обострителя

Применение емкостного обострителя позволило уменьшить влияние индуктивности разрядного контура на параметры воспроизводимого импульса и при необходимости сократить длительность фронта импульса тока.

Для уменьшения индуктивности разрядного контура применяются коаксиальные схемы нагружения с многожильным наружным обратным токопроводом [12]. Такая схема представлена на рис. 5.

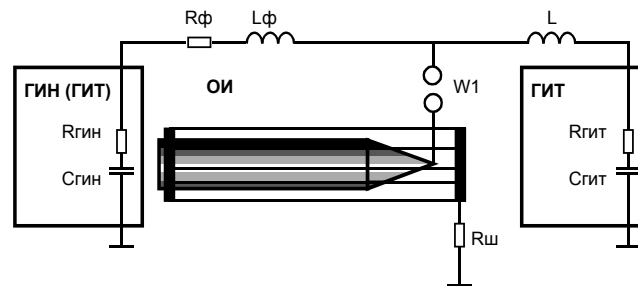


Рис. 5. Коаксиальная схема нагружения

Требуемые параметры импульсной составляющей тока молнии могут быть получены в обычной апериодической схеме генератора импульсных токов, т.е. в RLC – контуре. Однако в силу очень большой разницы между длительностями фронта и всего импульса формирование требуемого импульса возможно только при использовании сильного демпфирования переходного процесса. Последнее приводит к весьма низкому КПД схемы и, как следствие, – к необходимости существенного завышения выходного напряжения первичного накопителя энергии по сравнению с колебательным режимом разряда при той же величине максимального тока.

В апериодическом контуре на фронте импульса нарастание тока происходит по схеме замещения: «источник постоянного напряжения – $L - R$ » с постоянной времени

$$\tau_{\phi} \approx 2,2 \frac{L}{R}.$$

На спаде тока определяющим процессом является разряд емкости C первичного накопителя на сопротивление R с постоянной времени полуспада

$$\tau_{0,5} \approx 0,7RC.$$

Так как $\tau_{0,5} \gg \tau_{\phi}$, то $\tau_{ш} \approx \tau_{0,5}$. Максимальный ток в схеме приблизительно равен:

$$I_m \approx \frac{U_0}{R},$$

где U_0 – выходное напряжение емкостного накопителя.

Отношение постоянных времени

$$\frac{\tau_{ш}}{\tau_{\phi}} = 0,7 \frac{CR^2}{2,2L} \approx 0,32 \frac{CU_0^2}{LI_m^2}$$

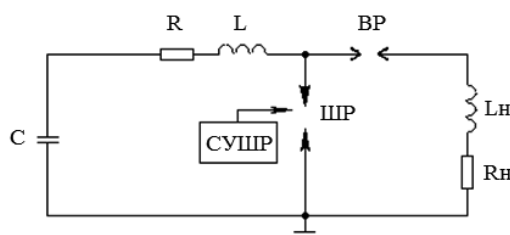
прямо определяет необходимую степень превышения первоначального запаса энергии $0,5CU_0^2$ над амплитудной величиной полезной энергии, переданной в нагрузку $0,5LI_m^2$. Таким образом, если использовать апериодическую схему для получения импульса с требуемыми амплитудно-временными

параметрами необходимо иметь генератор с выходным напряжением до 3–5 МВ, что трудно реализуемо в наших условиях из-за больших массогабаритных характеристик, а следовательно высокой стоимости оборудования.

Выходом из этого положения является применение колебательной схемы с использованием дополнительного разрядника – кроубара (КР), шунтирующего выход генератора в момент времени максимума тока. При этом вся первоначально запасенная энергия практически переводится в нагрузку. Кроубарный разрядник в таких установках должен без самопробоя выдерживать максимальное напряжение, запускаться при сравнительно малых напряжениях на основных электродах, обладать собственной индуктивностью, существенно меньшей, чем индуктивность основной разрядной цепи.

На экспериментальной базе 12 ЦНИИ МО РФ эксплуатируется генератор тока молнии, реализующий схему разряда с кроубаром. Однако этот генератор способен воспроизводить нормированные токовые воздействия при условии, что индуктивность нагрузки (объекта испытаний) не будет превышать 2 мкГн. Для снижения индуктивности объекта приходится прибегать к использованию различных схемных решений, снижающих общую индуктивность разрядного контура.

На рис. 6 приведена схема генератора тока молнии с использованием разработанной системы управления шунтирующего разрядника (СУШР).



ВР – выходной разрядник, ШР – шунтирующий разрядник,
СУШР – система управления шунтирующего разрядника

Рис. 6. Схема генератора тока с использованием системы управления шунтирующего разрядника

Работа генератора происходит следующим образом. После заряда от зарядного устройства накопительных конденсаторов до необходимого уровня напряжения запускается настроенный выходной разрядник (ВР) и в нагрузке в колебательном режиме формируется фронт импульса тока. При достижении максимума тока на систему управления шунтирующего разрядника подается напряжение, срабатывает настроенный разрядник (ШР) и шунтирует цепь питания нагрузки. Спад тока после срабатывания шунтирующего разрядника происходит по экспоненте, представленной на рис. 7.

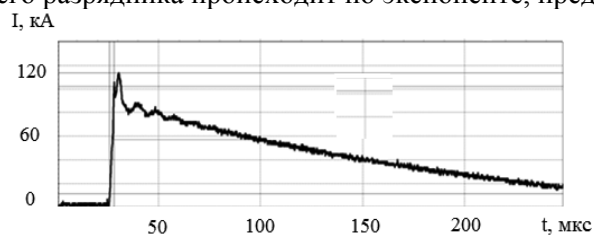


Рис. 7. Осциллограмма импульса тока при работе генератора в режиме «кроубара»

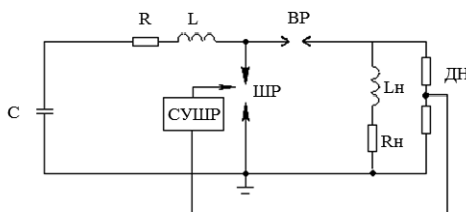
Основная проблема заключается в том, что электрофизические характеристики объектов испытания (нагрузки генератора) и схемы его подключения, которые в большинстве случаев остаются неизвестными, существенно влияют на параметры формируемого тока. Это приводит к тому, что настройку генератора приходится производить для каждого объекта индивидуально, многократно подвергая его нежелательному промежуточному воздействию. Поэтому основные операции по настройке генератора сводятся к подбору точного момента срабатывания шунтирующего разрядника путем последовательного приближения, что является достаточно трудоемким процессом, предусматривающим достаточно большое количество включений.

Увеличение индуктивности нагрузки (более 2 мкГн) приводит к увеличению фронта испытательного импульса тока и значительному уменьшению его амплитуды. Для точной регулировки момента срабатывания ШР разработана схема инициирования ШР с использованием опорного сигнала

синхронизированного с импульсом тока в нагрузке. Задержка по времени срабатывания ШР определяется параметрами элементов СУШР и регулируются оператором. Опорным сигналом является импульс напряжения с высоковольтного делителя (ДН), подключенного параллельно нагрузке.

Схема генератора с использованием делителя напряжения в системе управления шунтирующего разрядника приведена на рис. 8.

Возможно использование в качестве шунтирующего элемента высоковольтного диода (диодной сборки), обладающей различной проводимостью в зависимости от полярности приложенного напряжения. При прямом напряжении сопротивление диода не превышает нескольких десятков Ом, при обратном же напряжении его сопротивление достигает несколько мегаом. Использование высоковольтных диодныхборок является наиболее перспективным направлением дальнейшего исследования.



БР – выходной разрядник, ШР – шунтирующий разрядник,
СУШР – система управления шунтирующего разрядника, ДН – делитель напряжения

Рис. 8. Схема генератора с использованием делителя напряжения в системе управления шунтирующего разрядника

При невозможности воспроизведения испытательного воздействия с заданными параметрами необходимо произвести нагружение на пониженных уровнях и применить методику пересчета, исходными данными которой являются цифровые осциллограммы импульсного токового воздействия $I_{\text{возд}} = f(t)$ и реакции на него цепи объекта $I(t)$. При этом определяется реакция данной цепи на заданное воздействие $I_3 = f_3(t)$.

Для регистрации параметров воспроизводимых испытательных воздействий используются средства измерения, обеспечивающие регистрацию амплитудно-временных параметров импульсных токов с суммарной погрешностью не более $\pm 20\%$. В частности, может быть использован токоизмерительный шунт и (или) пояс Роговского [13]. Так же, в ходе проведения испытаний возникает необходимость измерять наведенные напряжение и ток во внутренних цепях испытываемых объектов. Наведенные напряжения имеют микросекундный временной диапазон и амплитуды в единицы и десятки вольт [14]. Для измерения наведенных напряжений во внутренних цепях используется разработанная система измерения импульсных напряжений (СИИН) [15] с системой бесперебойного электропитания, которая способна снять ограничение по времени использования системы измерения импульсного напряжения, исключает доступ оператора и обеспечивает помехоустойчивость работы во время длительной подготовки и проведения испытаний техники на действие токов молнии [16].

Таким образом, для испытаний различных объектов вооружения и военной техники на соответствие требованиям стойкости к действию токов молнии необходимо использовать схемы совместной работы генераторов импульсных токов и напряжений.

При этом выбор схем нагружения проводится индивидуально для каждого образца с учетом его свойств, характеристик (сопротивления и индуктивности) и места размещения.

Основные операции по настройке генераторов, реализующих схему разряда с кроубаром, сводятся к подбору точного момента срабатывания шунтирующего разрядника, что является достаточно трудоемким процессом.

При этом наиболее перспективным направлением дальнейшего развития является использование в качестве коммутирующего устройства высоковольтные диодные сборки.

Анализ возможностей, состояния и перспектив развития экспериментально-испытательной базы ЭМИ и токов молниевых разрядов ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России позволяет сделать вывод о ее готовности к обеспечению проводимых в рамках государственного оборонного заказа опытно-конструкторских работ по разработке новейших систем вооружения для всех видов и родов Вооруженных сил России. В настоящее время достигнуты близкие к максимальным значения важ-

нейших характеристик испытательных установок – выходные напряжения, мощность, размеры рабочих объемов.

Это не исключает, как следует из приведенных данных, возможности дальнейшей модернизации испытательных установок (особенно, воспроизводящих мощные импульсные токи) и увеличения возможностей по испытаниям крупногабаритных объектов прямым методом. За счет научно-методического обоснования способов локального облучения и поблочного нагружения можно обеспечить оценку соответствия требованиям по стойкости к импульсным электромагнитным воздействиям образцов, размеры которых достигают сотен метров.

Список литературы

1. Анисимов А.В., Балюк Н.В., Верховцев В.Н. и др. Физика ядерного взрыва. Том 3. Воспроизведение факторов взрыва. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. – 472 с.
2. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели. – М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.
3. Атмосфера. Справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1991.
4. Комягин С.И. Основы методологии электромагнитной стойкости беспилотных летательных аппаратов. – М.: Изд-во МИЭМ. 2007. – 158с.
5. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Ливитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 224с.
6. ЧалмесДж.А. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1974.
7. Перекрест В. Пожар в аэропорту Шереметьево. Кр.ru
8. Зырянов И. Пилоты не виноваты, что их не научили летать. tumen. Кр.ru
9. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2001. – 320 с.
11. Култыгин В.И. Самсонов Г.В. и др. Труды научно-практического семинара ВА им. Петра Велико 2017г. Научно-технический сборник. – С. 230–235.
12. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1986. – 286 с.
13. Лоцицкий Б.Н., Воеводин В.Г. и др. Основы метрологии и электрорадиоизмерения. – Л.: Министерство обороны СССР. Москва 1983. – 62 с.
14. Коваленко С.А., Максимов А.Ю. Методы и средства воспроизведения мощных импульсных токов и напряжений. – Технологии ЭМС. – 2010. – №1(32). – С. 73.
15. Агапов Е.В., Алгашев А.Б. и др. Разработка системы измерения импульсного напряжения. – Технологии, измерения и испытания в области ЭМС. Труды III Всероссийской НТК «ТехноЭМС 2016». – 2016. – С. 157.
16. Заруцкий А.О., Кокин А.Я., Красноперов Д.Б., Оленевский В.В. Система бесперебойного электропитания измерительной аппаратуры импульсного напряжения. – Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости. Труды V Всероссийской НТК «ТехноЭМС-2018». – 2018.- с.124.
17. Комягин С.И. Электромагнитная стойкость беспилотных летательных аппаратов. – М.: Красанд – 2019.- с.432.

Федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России). Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26, 141307.

Авторы

Агапов Евгений Васильевич, научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26, 141307.

Заруцкий Александр Олегович, младший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26, 141307.

Зеленский Игорь Иванович, старший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б, 141307.

Красноперов Дмитрий Борисович, старший научный сотрудник, к.т.н. ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б, 141307.

Оленевский Владислав Викторович, старший научный сотрудник. ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б, 141307.

Пашков Антон Юрьевич, старший офицер военно-научного комитета 12 Главного управления Министерства Обороны РФ.

Плыгач Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник; к.т.н. ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б, 141307.

Самсонов Григорий Владимирович, начальник лаборатории ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России». Россия, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б, 141307.

Agapov E.V., Zarutskiy A.O., Zelenskiy I.I., Krasnoperov D.B., Olenevskiy V.V., Pashkov A.Yu., Plygach V.A., Samsonov G.V.

Methods and means of testing weapons and military equipment samples at the experimental test base 12 Central Research institute under the influence of pulsed electromagnetic fields and lightning currents

Abstract. The article discusses the problems of testing large-sized weapons and military equipment for the action of electromagnetic radiation. The traditional and promising methods of reproducing the test effect — full-scale and local irradiation, as well as loading the hardware of the weapons and military equipment samples block by block — are highlighted. A brief description and characteristics of simulator installations are given, as well as their functioning and application. The possibilities of the experimental testing base of FGKU "12 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of Russia to reproduce the effects of lightning currents are investigated, the directions of its further development are determined.

Key words: electromagnetic field, lightning current, simulator, field forming system, shunt arrester, current and voltage generator

References

1. Anisimov A.V., Balyuk N.V., Verkhovtsev V.N. et al. Nuclear explosion physics. Volume 3. Reproduction of explosion factors. – M.: Publishing house of physical and mathematical literature, 2013. – 472 p. (In Russian)
2. Vance E.F. Effect of electromagnetic fields on shielded cables. – M.: Radio and communication, 1982. – 120 p. (In Russian)
3. The atmosphere. Handbook. – L.: Gidrometeoizdat, 1991. (In Russian)
4. Komyagin S.I. Fundamentals of the methodology of electromagnetic resistance of unmanned aerial vehicles. M.: MIEM Publishing House. 2007. – 158 p. (In Russian)
5. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Livitov V.I. Physical and engineering fundamentals of lightning protection. – L.: Gidrometeoizdat, 1978. 224 p. (In Russian)
6. Chalmes J.A. Atmospheric electricity. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. (In Russian)
7. Perekrest B. Fire at Sheremetyevo Airport. Кр.ру. (In Russian)
8. Zyryanov I. Pilots are not to blame for not being taught to fly. тumen. Кр.ру. (In Russian)
9. RD 34.21.122-87. Instructions for lightning protection of buildings and structures. - M.: Energoatomizdat, 1989. (In Russian)
10. Bazelyan E.M., Raizer Yu.P. Physics of lightning and lightning protection. - M.: FIZ-MATLIT, 2001. 320 p. (In Russian)
11. Kultigin V.I. Samsonov G.V. et al. Proceedings of the scientific and practical seminar VA named after Petra Veliko 2017 Scientific and technical collection. p. 230–235. (In Russian)
12. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. Calculation of inductances. – L.: ENERGOATOMIZDAT, 1986. p.137.
13. Lozitsky B.N., Voevodin V.G. et al. Fundamentals of Metrology and Electro-Radio Measurement. – L.: Ministry of Defense of the USSR. Moscow 1983. – p.62. (In Russian)

14. Kovalenko S.A., Maksimov A.Yu. Methods and means of reproducing powerful pulsed currents and voltages. - *EMC technology*. – 2010. – No. 1 (32). – p. 73. (In Russian)
15. Agapov E.V., Algashev A.B. et al. Development of a system for measuring pulse voltage. - Technologies, measurements and tests in the field of EMC. Proceedings of the III All-Russian NTK "TechnoEMS 2016". – 2016. – p. 157. (In Russian)
16. Zarutskiy A.O., Kokin A.Ya., Krasnoperov D.B., Olenevskiy V.V. Uninterruptible power supply system for pulse voltage measuring equipment. - Technologies, measurements and tests in the field of electromagnetic compatibility. *Proceedings of the V All-Russian NTK "TechnoEMS-2018"*. – 2018. – p. 124. (In Russian)
17. Komyagin S.I. The electromagnetic resistance of unmanned aerial vehicles. – M.: Krasan. – 2019 – p.432. (In Russian)

Federal State Treasury Institution «12 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation» (FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia»). Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring, 2b, 141307.

Authors

Agapov Evgeny Vasilievich, researcher FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring, 2b, 141307.

Zarutskiy Alexander Olegovich, junior researcher FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring, 2b, 141307.

Zelensky Igor Ivanovich, senior researcher FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring 2b, 141307.

Krasnoperov Dmitry Borisovich, senior researcher, Ph.D, FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring, 2b, 141307.

Olenevskiy Vladislav Viktorovich, senior researcher. FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring 2b, 141307.

Pashkov Anton Yurievich, senior officer of military-scientific committee, 12 Senior Management of Ministry of Defense of RF (12 GU); 119160 Moscow, Russian Federation.

Plygach Vladimir Alexandrovich, leading researcher, Ph.D, FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring, 2b, 141307. Ph.D.

Samsonov Grigory Vladimirovich, head of the laboratory FGKU «12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». Russia, Moscow region, SergievPosad, st. Spring, 2b, 141307.

УДК 537.868

К.А. Виноградов, В.Г. Кормишин, Д.И. Крохалев, М.В. Зорин, Д.Е. Щукин

Автоматизация процесса испытаний авиационной техники и вооружения на действие электромагнитных полей радиотехнических средств

Проанализирован процесс проведения испытаний авиационной техники на действие гармонических электромагнитных полей радиотехнических средств. Представлена структурная схема автоматизированного испытательного комплекса, рассмотрены особенности функционирования системы управления средствами проведения испытаний. Представлены состав и назначение программных модулей системы управления. Разработан метод автоматизированной обработки информации, поступающей с пирозлектрических датчиков наведенных токов. Данный метод основан на совместном использовании параметрического метода установления зависимости между двумя сигналами путем вычисления коэффициента корреляции Пирсона и нейронных сетей. Проведены исследования по оценке эффективности разработанного метода для идентификации полезных сигналов в поступающей информации.

Ключевые слова: электромагнитное поле, радиотехническое средство, автоматизированная система управления, обработка сигналов

Современные образцы авиационной техники и вооружения (АТ и В) имеют в своем составе большое количество электрических средств инициирования (ЭСИ). К ним относятся пироболты, пиропатроны, электродетонаторы и т.д. С помощью ЭСИ запускаются двигатели, срабатывают рули, средства катапультирования, запускаются системы пожаротушения, устройства сброса и др. ЭСИ и электрическую цепь, связанную с ними (предназначенную для их запуска), называют опасной цепью. В процессе эксплуатации образцы АТ и В подвергаются воздействиям гармонических электромагнитных полей (ЭМП) радиотехнических средств (РТС). Воздействие ЭМП приводит к возникновению наведенных токов в опасных цепях, которые могут стать причиной несанкционированного срабатывания ЭСИ образцов с аварийными последствиями. Для исключения таких ситуаций нормативными документами предусматривается экспериментальная оценка стойкости и безопасности использования образцов АТ и В в условиях воздействия ЭМП РТС [1].

Нормативными документами заданы требования по стойкости образцов АТ и В к полям РТС в очень широком диапазоне частот (от единиц мегагерц до десятков и даже сотен гигагерц), который разбит на несколько диапазонов. При проведении испытаний в нескольких поддиапазонах этого диапазона предполагается создание гармонических испытательных воздействий с шагом по частоте, не превышающим 10–15% каждого из поддиапазонов [2]. Испытания образцов АТ и В необходимо проводить с заземлением корпуса напрямую или через эквивалент носителя и (или) человека, и (или) без заземления корпуса. Кроме того, при проведении испытаний образцов АТ и В необходимо изменять как направления воздействия поля [3], так и его поляризацию [4]. Учитывая широкий диапазон частот воздействующего ЭМП и большое количество опасных цепей (до нескольких сотен у авиационных боевых комплексов с вооружением), общее число измерений параметров нагружения и реакции объекта испытаний может составлять десятки тысяч.

Условно процесс проведения испытаний образцов АТ и В можно разделить на три этапа. На первом этапе (при проведении испытаний на безопасность) штатные электровзрывные устройства (ЭВУ) в объектах испытаний заменяются спецборками, которые состоят из пирозлектрических преобразователей тока (ППТ), помещенных в корпуса штатных ЭВУ с выводами для измерительной аппаратуры [5]. На следующем этапе образец помещается в рабочий объем испытательной установки, в котором формируется испытательное воздействие с требуемыми параметрами (частота, амплитуда, расположение в пространстве относительно магнитной и электрической составляющей воздейству-

ющего поля). Токи, наведенные в опасных цепях объекта испытаний в результате воздействия, фиксируются измерительной аппаратурой. На третьем этапе осуществляется обработка результатов и формирование отчетной документации.

Большое количество испытательных воздействий и большой объем измерений приводят к тому, что испытания образцов на действие ЭМП РТС являются трудоемкими, дорогостоящими и требуют значительных временных затрат – до 6–8 месяцев. Эти затраты становятся еще более значительными, если операции по созданию испытательных воздействий (установка параметров работы генераторов и усилителей мощности), измерению параметров испытательных воздействий и наведенных токов, а также обработке результатов измерений осуществляются оператором вручную.

Поэтому для повышения достоверности результатов испытаний (минимизации ошибок оператора), сокращения сроков и стоимости работ целесообразно автоматизировать как отдельные участки процесса испытаний, так и весь процесс в целом [6]. Для этого требуется задействовать по определенному алгоритму набор разнородных электротехнических устройств (измерители напряженности и плотности потока энергии воздействующего поля, измерительную систему наведенных токов, генераторы и усилители мощности в различных частотных диапазонах и т.п.). Задача дополнительно усложняется тем, что используемые устройства и линии обмена данными должны надежно функционировать в сложной электромагнитной обстановке. Таким образом, автоматизация испытаний образцов АТ и В на стойкость и безопасность использования в условиях воздействия электромагнитных полей РТС является сложной и актуальной научно-технической задачей.

Для решения этой задачи в ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России разработан макет автоматизированного испытательного комплекса (АИК), предназначенного для проведения испытаний различных объектов на действие ЭМП РТС. Комплекс состоит из автоматизированной системы управления (АСУ), а также аппаратных средств, используемых при проведении испытаний. Обобщенная структурная схема АИК представлена на рис. 1.

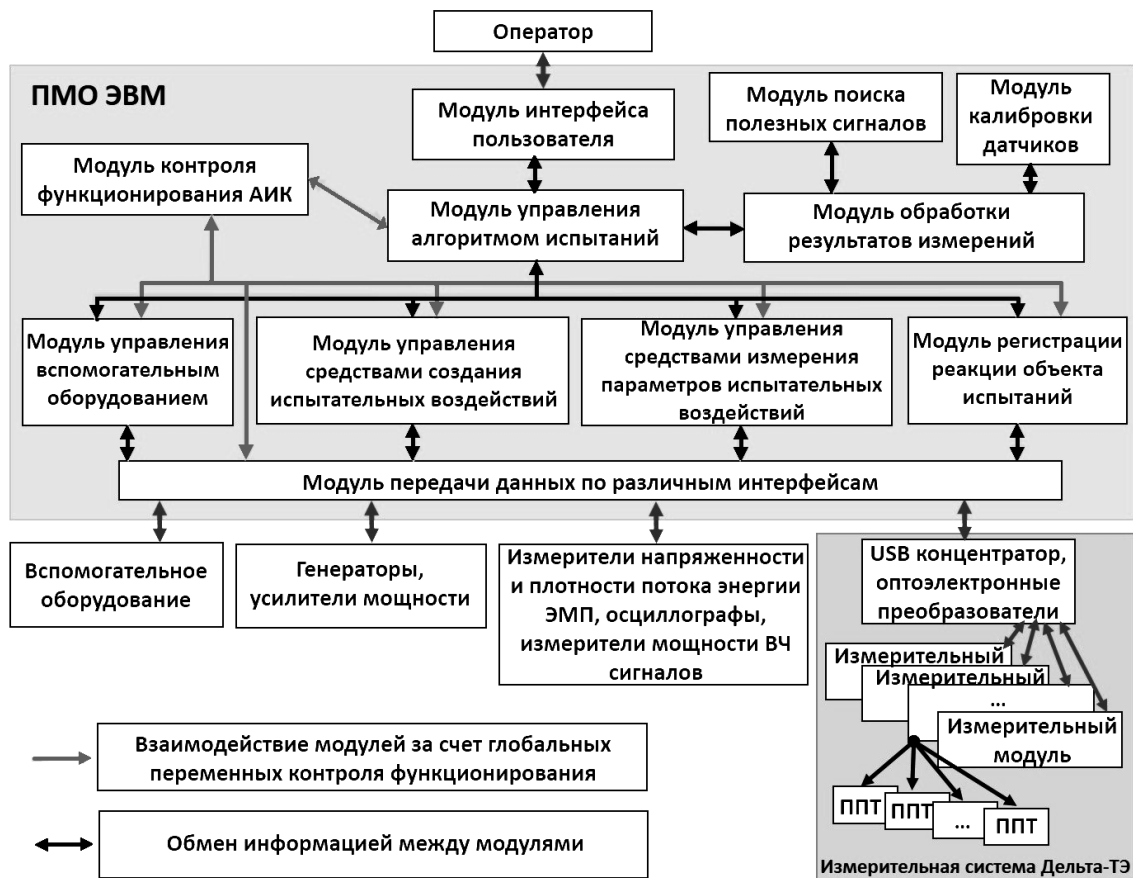


Рис. 1. Структурная схема АИК

АСУ включает в себя специализированное программно-математическое обеспечение (ПМО) и линии передачи данных, по которым осуществляется управление периферийными устройствами и получение измерительной информации.

ПМО АСУ построено по модульному принципу. В зависимости от решаемых задач оператор посредством модуля пользовательского интерфейса осуществляет выбор используемых средств воспроизведения и измерения испытательных воздействий, а также средств измерения реакции объекта испытаний. На основе требуемой конфигурации автоматизированного испытательного комплекса осуществляется формирование алгоритма работы АСУ: определяются частотный и амплитудный диапазоны испытательных воздействий, шаги дискретизации по частоте и амплитуде, вид и параметры модуляции сигнала, длительность воздействия, параметры работы линий передачи данных.

Модуль управления алгоритмом испытаний предназначен для обеспечения взаимодействия всех программных модулей и является ядром АСУ.

Модуль управления средствами создания испытательных воздействий и средствами измерений обеспечивает взаимодействие с периферийными устройствами по цифровым интерфейсам передачи данных. Данные модули обладают свойствами многопоточности и автономности. На модуль управления также возлагаются функции контроля состояния периферийных устройств и линий передачи данных.

Модуль обработки результатов измерений используется для вычисления величины наведенных токов на основании данных, зарегистрированных с ППТ.

Модуль калибровки датчиков предназначен для установления зависимости амплитуды полезного сигнала, формируемого ППТ, от величины протекающего тока. Калибровка осуществляется в автоматизированном режиме путем формирования в опасной цепи тока точной амплитуды в широком диапазоне амплитудных значений.

Модуль поиска полезных сигналов позволяет в автоматизированном режиме идентифицировать в информации, поступающей с ППТ, сигналы заданной формы, соответствующей форме эталонного сигнала.

Управление периферийными устройствами осуществляется по интерфейсам Ethernet, RS-232, GPIB и USB. Для управления устройствами, находящимися в непосредственной близости к ЭВМ, в защищенном от ЭМП помещении, применены интерфейсы GPIB и USB. Для сопряжения ЭВМ с устройствами, находящимися в мощных электромагнитных полях применены интерфейсы Ethernet и RS-232 в модификации, где в качестве линии передачи данных используется оптоволокно.

Для исключения нештатных ситуаций использован ряд методов и средств, обеспечивающих защиту элементов АСУ и периферийных устройств от действия мощных ЭМП.

Отдельным направлением автоматизации является обработка результатов измерений, полученных при испытаниях образцов АТ и В.

Для измерения величины токов, наведенных в опасных цепях объектов испытаний, в ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России разработана измерительная система «Дельта-ТЭ». В ее состав входят ППТ, преобразующие энергию наведенного тока в электрический импульс, измерительные модули, которые собирают информацию с преобразователей тока и оцифровывают ее, а также USB концентраторы и оптоэлектронные преобразователи, обеспечивающие передачу данных между модулями и ЭВМ по оптоволокну.

Полезный сигнал, поступающий с ППТ, представляет собой апериодический импульс напряжения длительностью несколько сотен миллисекунд с амплитудой, пропорциональной величине наведенного тока (рис. 2).

При проведении испытаний образцов АТ и В задача по автоматизированной идентификации полезных сигналов в информации, поступающей с ППТ, становится актуальной. Наибольшие трудности при решении данной задачи возникают в случаях, когда амплитуда полезного сигнала сопоставима с уровнем шума.

Для решения задачи автоматизированной идентификации полезных сигналов малой амплитуды разработан метод сегментной корреляции [7, 8], который базируется на совместном использовании параметрического метода установления зависимости между двумя сигналами путем вычисления коэффициента корреляции Пирсона [9] и непараметрического метода, основанного на нейронных сетях [10].

Разработанный метод реализуется в три этапа. На первом этапе участок исследуемого сигнала и сигнал, достоверно содержащий полезную информацию (эталонный сигнал), разбиваются на мно-

жество сегментов. На втором этапе для каждого из сегментов сигналов вычисляются коэффициенты корреляции Пирсона. На третьем этапе вычисленные коэффициенты подаются на входы нейронной сети, где суммируются с учетом весовых коэффициентов. Полученное значение суммы используется в качестве аргумента для функции активации, которая принимает значение, соответствующее наличию или отсутствию полезного сигнала в исследуемой информации.

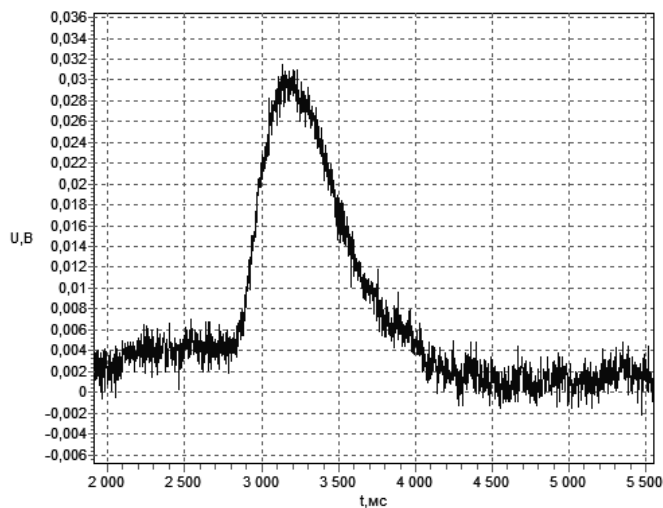


Рис. 2. Полезный сигнал, зарегистрированный с ППТ

Данный метод реализован в программном модуле поиска полезных сигналов АИК. Алгоритм работы модуля представлен на рис. 3.

На первом этапе программный алгоритм делит участок исследуемого сигнала и эталонный сигнал на десять сегментов. Число сегментов, на которые разбиваются сигналы, подобрано эмпирически. На втором этапе для каждого сегмента вычисляются коэффициенты корреляции Пирсона. На третьем этапе вычисленные значения коэффициентов корреляции подаются на входы нейронной сети, состоящей из 4-х нейронов, где обрабатываются с учетом весовых коэффициентов $v_1 \dots v_{13}$, а также порогового значения аргумента функции активации $f(\Sigma)$. Функция активации принимает значение, соответствующее наличию или отсутствию полезного сигнала в исследуемой информации. Весовые коэффициенты, а также пороговое значение аргумента функции активации нейронной сети вычисляются методом обратного распространения ошибки при ее обучении. Основным критерием при обучении нейронной сети является минимум ошибок первого и второго рода при идентификации сигналов.

Экспериментальные исследования показали, что программный модуль поиска полезных сигналов обеспечивает их идентификацию с вероятностью 0,95 при отношении сигнал/шум не менее 2,3/1. Использованный ранее метод, основанный на вычислении коэффициента корреляции, обеспечивает идентификацию полезных сигналов с вероятностью 0,95 при отношении сигнал/шум не менее 3,3/1. Параметрический метод, основанный на эмпирическом подборе параметров сигнала, обеспечивает его идентификацию при отношении сигнал/шум не менее 4,7/1.

Результат работы модуля идентификации полезных сигналов иллюстрирует рис. 4, где выделенные участки соответствуют идентифицированному полезному сигналу, амплитуда которого сопоставима с амплитудой шума ППТ.

Таким образом, разработанный комбинированный метод обработки сигналов и реализующий его программный алгоритм обеспечивают распознавание полезных сигналов в информации, поступающей с ППТ, при более низком по сравнению с ранее использованными параметрическими методами отношении сигнал/шум. Необходимо отметить, что разработанный метод может быть применен для идентификации других сигналов сложной формы на фоне шумов. Под сложной формой в данном случае подразумевается, что отличительной особенностью полезного сигнала от шума являются соответствующие форма и длительность фронта и спада, а также другие особенности. Проведенные исследования показали, что данный метод, например, не эффективен при обработке сигналов прямоугольной формы.

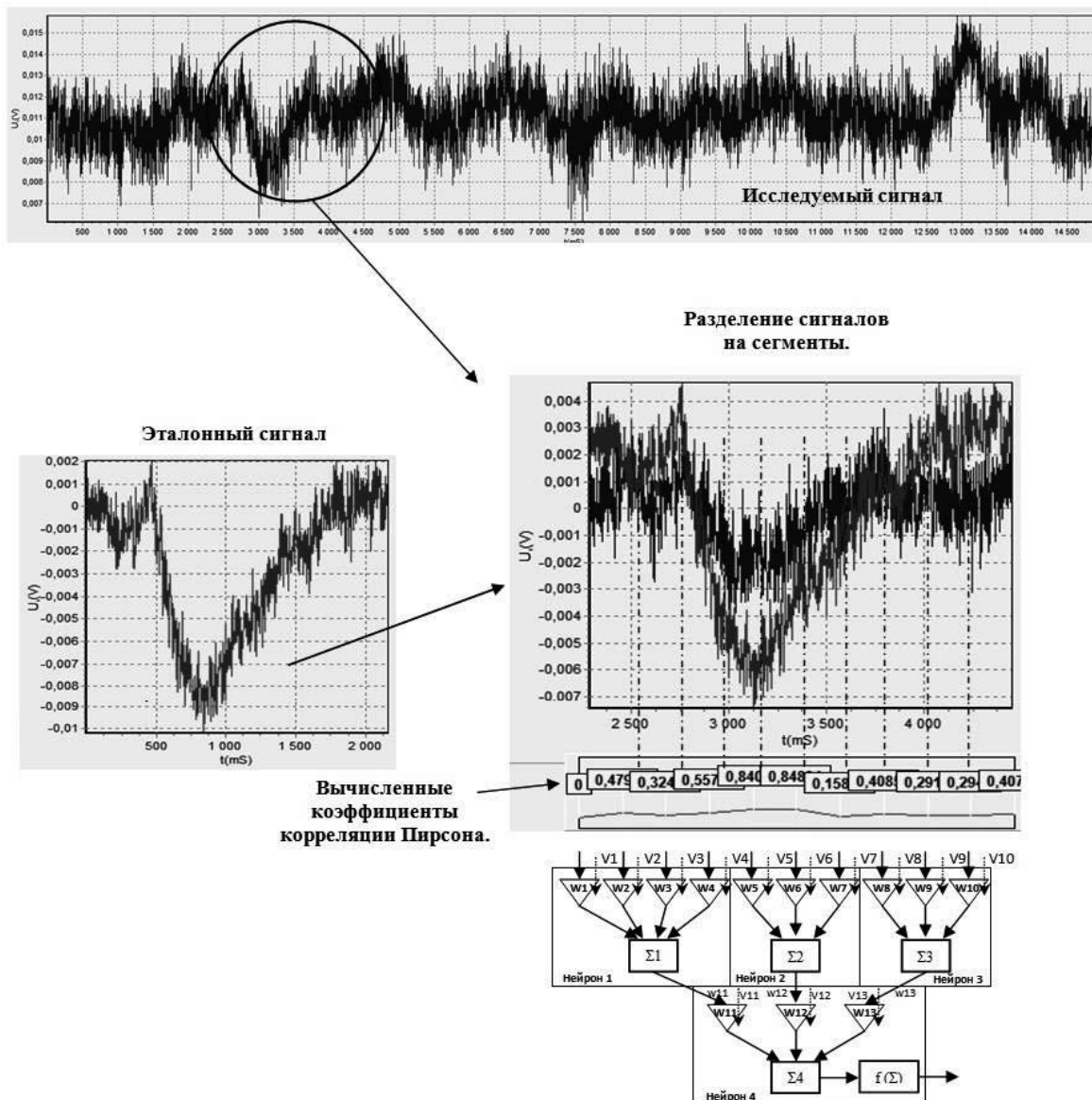


Рис. 3. Алгоритм работы модуля идентификации полезных сигналов

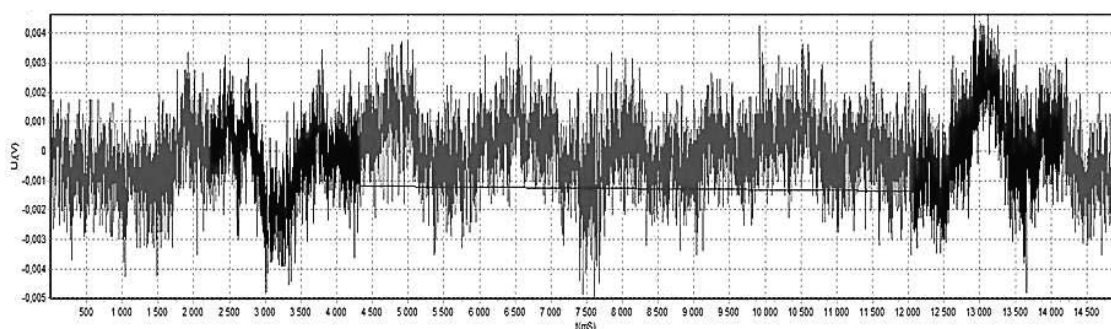


Рис. 4. Результат обработки информации, зарегистрированной с ППТ

Разработанный макет АИК позволил значительно сократить время, затрачиваемое на проведение испытаний образцов АТ и В на действие ЭМП РТС. Например, время, затраченное на проведение государственных испытаний вертолета Ка-31Р на безопасность эксплуатации в условиях воздействия ЭМП РТС в 2018 году, составило 1 месяц. Аналогичные испытания вертолета Ми-24 в 1986

году проводились в течение 6 месяцев. Сокращение времени испытаний достигнуто за счет автоматизации управления задающими генераторами, усилителями мощности, а также за счет обработки в режиме реального времени информации, поступающей с измерителя напряженности поля и ППТ в количестве 30 штук.

Список литературы

1. Варюхин Е.Г., Дубровин Е. А., Матюхевич С.Н., Назаренко В.В., Сидорюк П.А., Смирнов В.Е., Стрыгин В.Г. Нормативно-техническое обеспечение испытаний ракетного вооружения на действие электромагнитных полей радиотехнических средств и предложения по его совершенствованию. – Труды секции 22 им. академика В.Н. Челомея XL Академических чтений по космонавтике. Вып. 4 / Под ред. д.т.н., проф. А.Г.Леонова. – Реутов, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2016. – С. 251–261.
2. Акиншин И.В., Бзыта В.И., Варюхин Е.Г., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Матюхевич С.Н. Методы и средства испытаний вооружений и военной техники на действие электромагнитных полей радиотехнических средств. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 1 (32). – С. 79–88.
3. Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Пыж А.В. Особенности реализации прямого метода испытаний при оценке стойкости образцов авиационной техники к воздействию электромагнитных полей метрового диапазона. – Труды XXXIV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». – г. Серпухов, Филиал ВА РВСН им. Петра Великого, 2015. – С. 209–213.
4. Крохалев Д.И., Лаврищев А.В., Пыж А.В. Повышение точности оценки наведенных токов при испытаниях образцов ВВТ на действие гармонических электромагнитных полей. – Труды XXXVI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», часть 9. – г. Серпухов, филиал ВА РВСН им. Петра Великого, 2017 – С. 163–167.
5. Бзыта В.И., Варюхин Е.Г., Рекин И.Б., Сидорюк П.А. Бесконтактный пироэлектрический способ измерения величин высокочастотных наведенных токов. – Труды IX Российской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность ЭМС-2006». – С.-Пб., 2006.
6. Виноградов К.А. Разработка автоматизированного испытательного комплекса для обеспечения испытаний объектов на действие электромагнитных факторов. – Труды конференции «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств». – Москва, 2009.
7. Варюхин Е.Г., Виноградов К.А. Комбинированный метод идентификации полезных сигналов в информации, получаемой с пироэлектрических преобразователей тока. – Материалы XL научно-технической конференции молодых ученых – военных метрологов. – г. Мытищи, ГНМЦ МО РФ, 2015.
8. Бзыта В.И., Варюхин Е.Г., Виноградов К.А., Лаврищев А.В., Мелихов Д.В. Метод сегментной корреляции для обработки измерительной информации, поступающей с датчиков наведенного тока. – Труды Всероссийской научно-технической конференции «Техно-ЭМС 2013» «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости». Часть 2. / под ред. Кривова А.С. – М., ЗАО «НПФ «Диполь», 2013. – С. 13–16.
9. Общая теория статистики. 3-е издание, переработанное. Учебное пособие / Под ред. Шмойловой Р.А. – М.: Финансы и Статистика, 2002. – 560 с.
10. Рудковская Д., Пилиньский М., Рудковский Л., Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. – 383 с.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, дом 26.

Авторы

Виноградов Константин Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Кормишин Владимир Георгиевич, заместитель начальника отдела ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Крохалев Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Зорин Максим Владимирович, главный эксперт военно-научного комитета 12 Главного управления Министерства Обороны РФ, г. Москва.

Щукин Дмитрий Евгеньевич, младший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России; Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, 2б.

Vinogradov K.A., Kormishin V.G., Krokhalev D.I., Pashkov A.Yu., Schukin D.E.

Automatization of Tests of Aviation Technics on the Action of Electromagnetic Fields of Radio Aids

Abstract. The process of testing aviation technics and arms on the action of harmonic electromagnetic fields generated by radio aids is analyzed. The block diagram of automatized test complex is presented, and the features of operation of automatized system intended for test facilities control are considered. The composition and destination of program modules of control system are presented. A method for automatized processing measurement information received from pyroelectric sensors of induced currents is developed. The method is based on joint use of parametric method for determination of relation between two signals via calculation of Pearson's correlation coefficient and neural networks. The efficiency of this method for identification of useful signals in measurement information is estimated.

Key words: electromagnetic field, radio aids, automatized control system, signal processing

References

1. Varyukhin E.G., Dubrovin E.A., Matyukhivich S.N. and others. Normativno-tekhnicheskoe obespechenie ispytaniy raketnogo vooruzheniya na deystvie elektromagnitnykh poley radiotekhnicheskikh sredstv i predlozheniya po ego sovershenstvovaniyu [Normative & Technical Support of Rocket Armament Tests to Action of Electromagnetic Fields of Radio Aids and Suggestions for Its Development]. *Trudy sekcii 22 XL Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike – Proc. Section 22 of XL Academic Readings on Cosmonautics*. Reutov, 2016, pp. 251–261. (In Russian)
2. Bzyta V.I., Varyukhin E.G., Dubrovin E.A. and others. Tests Methods and Facilities for Testing Arms and Military Equipment on Action of Electromagnetic Fields Generated by Radio Transmitter and Radars. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, no.1 (32), pp. 79–88. (In Russian)
3. Dubrovin E.A., Krokhalev D.I., Pyzh A.V. Osobennosti realizatsii pryamogo metoda ispytaniy pri otsenke stoykosti obraztsov aviatsionnoy tehniky k vozdeystviyu elektromagnitnykh poley metrovogo diapazona [The peculiarities of realization of direct test method when estimating immunity of aircraft equipment to action of electromagnetic fields of VHF band]. *Trudy XXXIV Vserossiyskoy konferentsii «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funktsionirovaniya slojnykh tehnicheskikh i informazionnykh sistem», chast' 7 – Proc. XXXIV All-Russian Conference «Problems of efficiency and operation safety of complicated technical and informational systems», part 7. Serpukhov, 2015, pp. 209–213. (In Russian)*
4. Krokhalev D.I., Lavrishev A.V., Pyzh A.V. Povyshenie tochnosti ocenki navedennykh tokov pri ispytaniyah obraztsov vooruzheniya i voennoy tehniky na deystvie garmonicheskikh elektromagnitnykh poley [Increase of induced currents estimation accuracy when testing arms and military technics for action of harmonic electromagnetic fields]. *Trudy XXXVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funkcionirovaniya slozhnykh tehnicheskikh i informazionnykh sistem», chast' 9 – Proc. XXXVI All-Russian scientific and technical conference «Problems*

- of efficiency and operation safety of complicated technical and informational systems», part 9. Serpukhov, 2017, pp. 163–167. (In Russian)*
5. Bzyta V.I., Varyukhin E.G., Rekin I.B., Sidoryuk P.A. Beskontaktnyy piroelektricheskiy sposob izmereniya velichin vysokochastotnykh navedennykh tokov [Contactless pyroelectric method for the measurements of the high-frequency induced currents]. *Trudy IX Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii EMS-2006 – Proc. IX Russian scientific and technical conference EMC-2006*. St. Petersburg, 2006. (In Russian)
 6. Vinogradov K.A., Razrabotka avtomatizirovannogo ispytatel'nogo kompleksa dlya obespecheniya ispytaniy ob'ektov na deystvie elektromagnitnykh faktorov [Development of the automatized test complex for testing objects on action of electromagnetic factors]. *Trudy konferencii «Elektromagnitnaya sovmestimost' i proektirovanie elektronnykh sredstv» – Proc. conference «Electromagnetic compatibility and designing of electronic instrumentation»*. Moscow, 2009. (In Russian)
 7. Varyukhin E.G., Vinogradov K.A. Kombinirovannyi metod identifikatsii poleznykh signalov v informatsii, poluchaemoy s piroelektricheskikh preobrazovateley toka [The combined method of useful signals identification in the information received from pyroelectric current sensors]. *Materialy XL nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodykh uchennykh – voennykh metrologov – Proc. XL scientific and technical conference of young scientists – military metrologists*. Mytishi, 2015. (In Russian)
 8. Varyukhin E.G., Vinogradov K.A. Metod segmentnoy korrelyatsii dlya obrabotki izmeritel'noy informatsii, postupayushey s datchikov navedennogo toka [Method of segment correlation for processing of measuring information from induced current sensors]. *Trudy konferencii «Tekhno-EMS 2013». Chast' 2 – Proc. Conf. «Techno-EMC 2013». Part 2*. Moscow, 2013, pp. 13–16. (In Russian)
 9. *Obschaya teoriya statistiki* [The general theory of statistics]. Textbook. 3^d ed., corrected. Edited by Shmoylova R.A. Moscow: Financy i Statistika Publ., 2002. – 560 p. (In Russian)
 10. Rudkovskaya D., Pilin'skiy M., Rudkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechyotkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and indistinct systems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2006. – 383 p. (In Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Authors

Vinogradov Konstantin A., Ph.D, division head, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Kormishin Vladimir G., assistant division head, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Krokhalev Dmitry I., Ph.D, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

Zorin Maxim V., chief expert of military-scientific committee, 12 Senior Management of Ministry of Defence of RF (12 GU); 119160 Moscow, Russian Federation.

Schukin Dmitry E., younger scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII); ul. Vesennyyaya, 2b, 141307 Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation.

УДК 621.315

Е.В. Лещук, В.М. Лоборев, С.В. Пантелеев, Д.С. Прокушев

Опасность воздействий сверхвысокочастотного электромагнитного излучения солнечных космических электростанций на околоземные объекты

В статье определены энергетические параметры сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения солнечных космических электростанций (СКЭС) при случайном или умышленном облучении околоземных объектов. Возможное воздействие на околоземные объекты излучения СКЭС ранее не рассматривалось. Анализируются механизмы действия СВЧ излучения на объекты с рассчитанными параметрами. Для достижимых плотностей потоков энергии СВЧ излучения показана опасность воздействия на околоземные объекты. Особенностью воздействия мощного СВЧ излучения на материалы объектов является их неравномерный нагрев по глубине. Проведены расчётные оценки снижения порогов инициирования разряда у материалов с различными диэлектрическими характеристиками и разными размерами неоднородностей. Модели могут быть применены для оценки порогов пробоя у поверхности различных структур. Расчётные оценки тестированы экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: солнечные космические электростанции, околоземные объекты, сверхвысокочастотное электромагнитное излучение, СВЧ

Специалисты Японии, США, Китая и Италии проводят исследования по трансформации солнечной энергии в СВЧ излучение и передаче его на Землю [1–7]. Ещё в 1976 году Вильям Браун (США) осуществил первую передачу СВЧ излучения мощностью 30 кВт на расстояние 1.6 км [8]. Возможность доставки СВЧ излучения на большие расстояния и воздействия его на космический мусор обсуждалась в [9].

Для преобразования солнечной энергии в энергию СВЧ излучения на космических электростанциях предполагается разместить фотоэлектрические элементы, СВЧ генераторы и передающие антенны. Станции будут передавать СВЧ энергию на Землю, а специальные устройства – ректенны (от англ. rectify и antenna) преобразуют её в постоянное напряжение. В одном из проектов для восстановления рифового рыбоводства наземную часть солнечной электростанции планируется создать на острове Хелен республики Палау в Тихом Океане. Об этом проекте было объявлено на конференции Организации Объединённых Наций по проблемам изменения климата Индонезии (Bali Climate Change Conference) в декабре 2007 года. Доставка энергии Солнца на Землю считается экологически чистым процессом [10], однако это предположение требует всесторонней проверки. В частности, вывод на орбиту СКЭС не исключает возможности использования их в военных целях, а именно для преднамеренных электромагнитных атак космических, воздушных и наземных объектов. Перенаправить луч с наземной приемной станции и атаковать космические, воздушные или наземные объекты электромагнитным излучением может оказаться несложной задачей для пунктов управления СКЭС. Военные задачи СКЭС могут быть весьма разнообразными: поражение космических объектов, дезорганизация управления регионов или мегаполисов, воздействие на военные базы, транспорт, на объекты транспортировки нефти и газа, воздействие на финансовые учреждения и др.

Для создания станций на околоземных и стационарных орбитах потребуется несколько лет, но уже в настоящее время анализ возможных последствий воздействия СКЭС является актуальной задачей. В работе [11] оценены физические ограничения на доставку мощного электромагнитного излучения с космической платформы на Землю. Учтено изменение теплофизических свойств материалов при воздействии на приёмники излучения, безэлектродный и инициированный разряд в атмосфере. Определены предельно допустимые параметры излучения на Земле. Показано, что даже с учётом физических ограничений мощность излучения может быть достаточной для оказания поражающего или помехового воздействия. В работе [12] проанализировано влияние излучения СКЭС на возможное

поведение населения районов и городов. Показано, что при радиусах луча 300-500 метров могут произойти существенные потери работоспособности населения в отдельных районах мегаполисов. Представлены численные оценки влияния панического заражения и времени оповещения на потери работоспособности населения. Проведен анализ последствий воздействия излучений СКЭС на низкоорбитальных и геостационарных орбитах. Опасным представляется военное использование геостационарных солнечных электростанций с их возможностью неожиданного воздействия на населенные пункты. В [13] анализируется опасность электромагнитной атаки наземных промышленных объектов сверхвысокочастотным излучением СКЭС. Сделан вывод о возможных катастрофических последствиях при воздействии на системы электроснабжения мегаполисов.

Возможное воздействие на околоземные объекты излучения СКЭС ранее не рассматривалось. Исходными данными для проведения оценок воздействия излучения СКЭС являются уровни плотности потока энергии (ППЭ) СВЧ излучения, которую можно доставить с космической станции на такие объекты. Ограничения по ППЭ определяются двумя физическими эффектами. Первым из них является безэлектродный пробой в свободной атмосфере, экранирующий объект от СВЧ излучения (см. рис. 1).

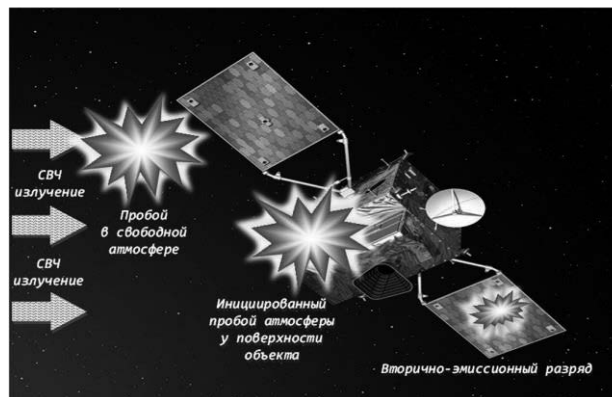


Рис.1. Схема возникновения СВЧ пробоя атмосферы у космического аппарата

Высота его возникновения и плотность потока энергии СВЧ излучения для возникновения пробоя зависят от параметров излучения и давления атмосферы. Пороговые величины полей СВЧ пробоя можно оценить с помощью системы уравнений электрон-ионной кинетики [14, 15]. Параметры полей СВЧ пробоя для непрерывного режима определялись по лавинообразному росту концентрации электронов в области пробоя, т.е. из условия $\delta N/t > 0$, где N – концентрация свободных электронов. Для импульсного режима за условия возникновения пробоя можно принять равенство $\epsilon_p = 0$, где ϵ_p – диэлектрическая проницаемость области пробоя атмосферы. Рассчитанные зависимости тестировались по ранее проведенным работам для оценки полей пробоя при малых площадях облучения [8]. Минимальная пробойная ППЭ при длине волны $\lambda = 3,0$ см составляет 4 МВт/м^2 и находится в диапазоне высот $40 \text{ км} \leq H \leq 80 \text{ км}$. С уменьшением длины волны значение минимальной пороговой ППЭ – W_{\min} увеличивается и достигает при $\lambda = 0,3$ см 500 МВт/м^2 на высотах до 65 км. Важно, что при увеличении радиуса пятна пороговые ППЭ уменьшаются и в пределе при $r \rightarrow \infty$ становятся равными W_{\min} .

Другим физическим эффектом, ограничивающим мощность излучения СКЭС, доставляемого на околоземные объекты без их экранировки плазменной областью, является иницированный СВЧ пробой атмосферы. В настоящее время существует несколько моделей иницирования СВЧ пробоя. Часть из них основаны на предположении о возрастании электрического поля у поверхности неоднородной мишени. Модель, представленная в [11], основана на предположении об усилении поля на диэлектрических неоднородностях. Для определения качественной картины иницирования пробоя предлагается использовать модель волокнистого изолятора. Ранее эта модель применялась для объяснения снижения пробойных напряжений емкостей при постоянном и переменном токе [16]. Модель состоит из параллельных цилиндрических стержней одинакового радиуса r и бесконечной длины, расположенных в вершинах квадратов со стороной a . Проведены расчетные оценки снижения порогов иницирования разряда у материалов с различными диэлектрическими характеристиками и разными размерами неоднородностей. Модели могут быть применены для оценки порогов пробоя у поверхности различных структур. Расчетные оценки тестированы экспериментальными исследованиями.

ми. На рис. 2 представлены расчётные значения достижимых уровней СВЧ полей без пробоя у поверхности околоземных объектов на различных высотах от Земли.

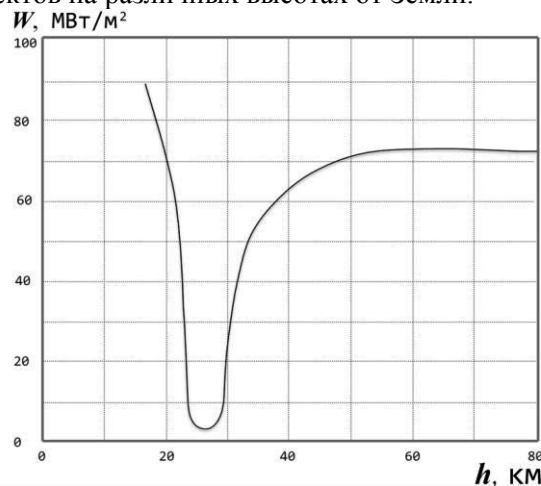


Рис. 2. Обобщённая зависимость плотности потока энергии СВЧ излучения для пробоя атмосферы

Возможен и вторично-эмиссионный разряд на поверхности мишени в космосе, но он возникает только в глубоком вакууме, что не достижимо для околоземных объектов. Поэтому это воздействие остается за рамками данной статьи.

Для полученных значений уровней СВЧ излучения, доставляемого на околоземные объекты, возможны различные физические механизмы воздействия.

Одним из механизмов воздействия СВЧ излучения на околоземные объекты может являться тепловой механизм разрушения конструкционных материалов. Тепловой механизм воздействия возможен в диэлектрических конструкциях объектов. Воздействию излучения СКЭС будут подвержены теплоизоляция, солнечные батареи, композиционные материалы, оптические элементы, диэлектрики датчиков и антенно-фидерных устройств, различные герметики и клеи, соединительные кабельные линии и разъемы. Для однослойных конструкционных материалов будет характерно образование стоячих волн по глубине. Наибольшему нагреву подвержены зоны в пучностях стоячих волн. Меньшее воздействие испытывают образцы, у которых расстояние от облучаемой поверхности до внутренних металлических слоев меньше четверти длины волны излучения. Для слоистых материалов поглощение энергии при плотном контакте между диэлектриком и возможными отражающими покрытиями происходит в диэлектрических слоях корпуса. Для исследования этого механизма воздействия следует учитывать многократное отражения электромагнитного излучения на границах материалов и изменение их электродинамических и теплофизических свойств. Модели конструкционных материалов в общем виде можно представить в виде плоскостройной среды (рис. 3).

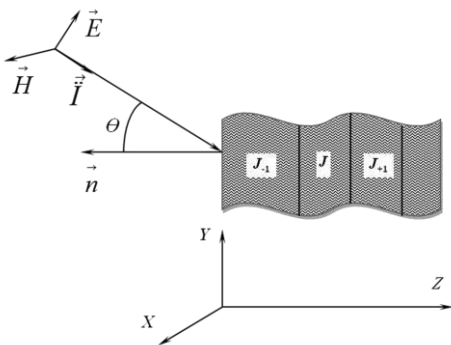


Рис. 3. Расчётная схема воздействия СВЧ излучения

Под углом к поверхности объекта падает плоская монохроматическая волна. Определяется электромагнитное и температурное поля во всех слоях с учётом зависимости диэлектрических и теплофизических свойств от температуры. Для каждого слоя составляются уравнения Максвелла. Зависимости теплофизических свойств задаются либо на основе экспериментальных данных, либо рассчитываются на основе феноменологических представлений. Особенностью воздействия мощного СВЧ излучения на материалы объектов является их неравномерный нагрев по глубине.

Происходит это из-за неравномерного объёмного поглощения СВЧ излучения в элементах конструкции объектов, что связано с затуханием падающей волны и образованием стоячих волн по глубине конструкции. На рис. 4 представлена картина теплового поля для длины волны 2 см без фазовых переходов в материале.

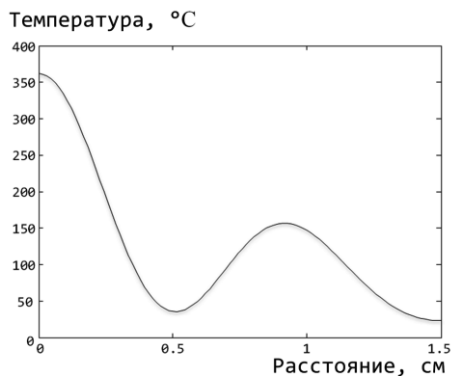


Рис.4. Качественная картина изменения температурного поля по глубине материала конструкции в СВЧ излучении без учета фазовых переходов. Плотность потока СВЧ излучения на материале 20 Вт/см² для длины волны излучения $\lambda = 2$ см

Рис. 5 показывает картину теплового поля с фазовыми переходами в среде СВЧ излучения с длиной волны 1 см. Видно, что рост температуры образца замедляется после первой секунды облучения. Происходит это из-за затрат энергии на фазовые превращения. Такой неравномерный прогрев приведет к растрескиванию материалов из-за возникающих термических

напряжений или к тепловому взрыву в облучаемом объеме. Первые могут возникать в различных стеклах, вторые – в композиционных материалах конструкций при выделении продуктов разложения связующих смол.

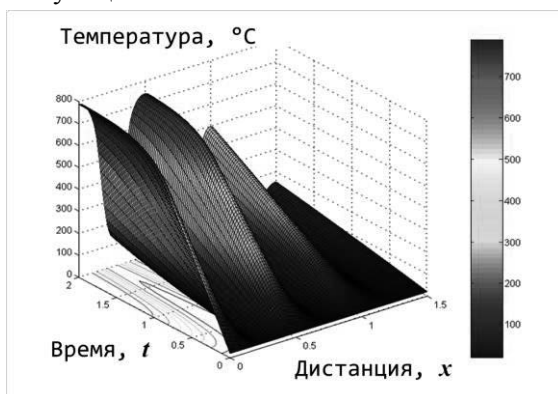


Рис. 5. Качественная картина роста температуры в материале конструкции с учетом фазовых переходов. Плотность потока СВЧ излучения на материале 200 Вт/см² для длины волны излучения $\lambda = 1$ см

Другим механизмом воздействия СВЧ излучения СКЭС на околоземные объекты может быть изменение их теплового баланса. При облучении объектов температурное поле в них будет определяться помимо естественных факторов ещё и мощностью падающего на него СВЧ излучения СКЭС, его длиной волны, поляризацией, плотностью потока излучения на цели и физи-

ческими механизмами взаимодействия излучения с материалами. Реализуется сложный механизм взаимодействия излучения с конструкцией объекта и его внутренним наполнением. Тепловой механизм взаимодействия СВЧ излучения с околоземными объектами требует всестороннего изучения.

Заключение

Создание солнечных космических станций может привести к возникновению новых мировых угроз. Страны-разработчики станций могут получить преимущества в военном отношении. Следует отметить, что чем ближе ввод в эксплуатацию СКЭС, тем актуальней становятся вопросы их безопасного использования. На некоторые из этих вопросов можно ответить в настоящее время, другие потребуют всестороннего изучения. В работе показано, что плотность потока сверхвысокочастотного излучения солнечных космических электростанций на поверхности околоземных объектов может достигать нескольких сотен ватт на сантиметр квадратный. Такие поля достаточны для повреждения конструктивных элементов околоземных объектов и изменения температурного режима их работы.

Для устранения возможности использования станций в военных целях, ещё до этапа вывода их на орбиту странам-разработчикам следует подписать совместное соглашение об отказе от применения солнечных космических станций в военных целях.

Список литературы

1. Glaser P.E. Power from the Sun: it's Future. // Science. vol.162, p. 857, 1968.
2. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Проблемы солнечных космических электростанций. // Успехи физических наук, том 123, вып. 4, с. 633, декабрь 1977.
3. Грилихес В.А. Солнечные космические энергостанции. – Л.: Наука, 1986.
4. Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В. Космические энергосистемы. – М.: Машиностроение, 1990.
5. Ванке В.А. Электроэнергия из космоса – солнечные космические станции. // Ж-л радиоэлектроники. 12, 2007.
6. Нариманов Е.А. Космические солнечные электростанции. – М.: Знание, 1991.

7. Нагатоми М., Сасаки С., Наруо Й., Ванке В.А. // Работы Института космических исследований Японии в области космической энергетики. // Успехи физических наук, т. 164, с. 631, июнь 1994.
8. СВЧ энергетика. Под ред. Э. Окреса. – М.: Мир, 1971.
9. Пантелеев С.В., Киселев В.В. Powerful Ultrahighfrequency Electromagnetic Interaction with Multilayer Heterogeneous Materials // AMEREM 96, Albuquerque, USA, 1996.
10. Э. Дж. Нейлос. Новые разработки в области направленной передачи электромагнитной энергии. // пер. ТИИЭР, т.66, № 3, март 1978.
11. Пантелеев С.В. Физические ограничения доставки мощного сверхвысокочастотного электромагнитного излучения с космической платформы на остров Хелен // Ж-л радиоэлектроники, 2012, № 6.
12. Пантелеев С.В., Соковых О.В. Солнечные космические станции — стратегическое нелетальное оружие будущего // Стратегическая стабильность, 2013, № 4, с. 34.
13. Пантелеев С.В., Лещук Е.В., Лоборев В.М. Опасность электромагнитной атаки наземных объектов сверхвысокочастотным излучением солнечных космических электростанций // Стратегическая стабильность, 2015, № 3, с.12.
14. Мак – Дональд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. – М.: Мир, 1969.
15. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, 1973.
16. Сканави Г.И. Физика диэлектриков. ФМГИ, Москва, 1969.

*Федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации.
141300, Московская обл., г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2Б*

Авторы

Лещук Елена Васильевна – научный сотрудник, ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России. 141300, Московская обл., г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2Б.

Лоборев Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России. 141300, Московская обл., г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2Б.

Пантелеев Станислав Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России. 141300, Московская обл., г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2Б.

Прокушев Денис Сергеевич – научный сотрудник, ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России. 141300, Московская обл., г. Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2Б.

Leschukh E.B., Loborev V.M., Panteleev S.V., Prokushev D.S.

The danger of ultra-high-frequency radiowaves exposure from the space-based solar power plants on the near-earth objects

Abstract. In a paper, energy parameters of ultra-high frequency (UHF) electromagnetic radiation of space-based solar power plants are spotted at casual or deliberate bombarding radiation on the near-Earth objects. Possible UHF radiowaves action on objects was not examined earlier. Activity mechanisms on objects of the UHF-radiowaves with the counted parameters are analyzed. For achievable of UHF-radiowaves energy flux density with possible dangerous action on near-Earth objects is shown. Feature of the powerful UHF electromagnetic flow action on objects materials is their non-uniform heating on depth. Settlement estimates of decrease in thresholds discharge initiation at materials with various dielectric performances and different inhomogeneities sizes are lead. Models can be applied to a thresholds disruption estimate near various structures surfaces. Settlement estimates by experimental researches are tested.

Key words: space-based solar power plants, near-earth objects, UHF, electromagnetic radiation

References

1. Glaser P.E. Power from the Sun: it's Future. Science. Vol.162, p. 857, 1968.
2. Vanke V.A., Lopukhin V.M., Savvin V.L. Problemy solnechnykh kosmicheskikh elektrostantsii. Uspekhi fizicheskikh nauk. Vol. 123, ed. 4, p. 633, December, 1977. (in Russian).

3. Grilikhes V.A. *Solnechnye kosmicheskie energostantsii*. Leningrad, Nauka Publ., 1986. (in Russian)
4. Vanke V.A., Leskov L.V., Luk'ianov A.V. *Kosmicheskie energosistemy*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. (in Russian).
5. Vanke V.A. *Elektroenergiia iz kosmosa – solnechnye kosmicheskie stantsii*. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 12, 2007. (in Russian).
6. Narimanov E.A. *Kosmicheskie solnechnye elektrostantsii*. Moscow, Znanie Publ., 1991. (in Russian)
7. Nagatomo M., Sasaki S., Naruo I., Vanke V.A. *Raboty Instituta kosmicheskikh issledovaniy Iaponii v oblasti kosmicheskoi energetiki*. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol.164, p. 631, June, 1994. (in Russian)
8. *SVCh energetika*. Edited by E. Okress. Moscow, Mir Publ., 1971.
9. Panteleev S.V., Kiselev V.V. *Powerful Ultra-High Frequency Electromagnetic Interaction with Multilayer Heterogeneous Materials*. AMEREM 96, Albuquerque, USA, 1996.
10. E. Dzh. Neilos. *Novye razrabotki v oblasti napravlennoi peredachi elektromagnitnoi energii*. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike – Proceedings of the Institute Electrical and Electronics Engineers*. IEEE trans. Vol.66, № 3, March, 1978.
11. Panteleev S.V. *Fizicheskie ogranicheniia dostavki moshchnogo sverkhvysokochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniia s kosmicheskoi platformy na ostrov Khelen*. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2012, №6. (in Russian).
12. Panteleev S.V., Sokovykh O.V. *Solnechnye kosmicheskie stantsii – strategicheskoe neletal'noe oruzhie budushchego*. *Zhurnal Strategicheskaiia stabil'nost' – Strategic Stability Journal*, 2013, № 4, p.34. (in Russian).
13. Panteleev S.V., Leshchuk E.V., Loborev V.M. *Opasnost' elektromagnitnoi ataki nazemnykh ob'ektov sverkhvysokochastotnym izlucheniem solnechnykh kosmicheskikh elektrostantsii*. *Zhurnal Strategicheskaiia stabil'nost' – Strategic Stability Journal*. 2015, № 3, p.12. (in Russian).
14. Mak-Donal's A. *Sverkhvysokochastotnyi probol v gazakh*. Moscow, Mir Publ., 1969. (in Russian).
15. Gurevich A.V., Shvartsburg A.B. *Nelineinaia teoriia rasprostraneniia radiovoln v ionosfere*. Moscow, Nauka Publ., 1973.
16. Skanavi G.I. *Fizika dielektrikov*. FMGI, Moscow, 1969.

Federal State Establishment «12th Central Research Institute» of the Russian Defence Ministry, 141300, Moskhovskhaia obl., g. Sergiev Posad, ul. Vesenniaia, 2B, Russian Federation.

Authors

Leshchuk Elena Vasil'evna, researcher, Federal State Establishment «12th Central Research Institute» of the Russian Defence Ministry. 141300, Moskhovskhaia obl., g. Sergiev Posad, ul. Vesenniaia, 2B, Russian Federation.

Loborev Vladimir Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, senior researcher, Federal State Establishment «12th Central Research Institute» of the Russian Defence Ministry. 141300, Moskhovskhaia obl., g. Sergiev Posad, ul. Vesenniaia, 2B, Russian Federation.

Panteleev Stanislav Vasil'evich, doctor of technical sciences, professor, senior researcher, Federal State Establishment «12th Central Research Institute» of the Russian Defence Ministry. 141300, Moskhovskhaia obl., g. Sergiev Posad, ul. Vesenniaia, 2B, Russian Federation.

Prokushev Denis Sergeevich, researcher, Federal State Establishment «12th Central Research Institute» of the Russian Defence Ministry. 141300, Moskhovskhaia obl., g. Sergiev Posad, ul. Vesenniaia, 2B, Russian Federation.

УДК 537.877

Н.В. Лебедев, С.А. Назаров, В.А. Никольский.

Комплекс численных методик для определения характеристик импульсного электромагнитного поля, проникающего через щелевые неоднородности электромагнитного экрана в среде ионосферной плазмы Земли

В работе представлен комплекс методик для расчета характеристик импульсного электромагнитного поля, проникающего через щелевые неоднородности электромагнитного экрана в среде ионосферной плазмы Земли. Комплекс включает в себя две расчетные методики. Первая методика предназначена для вычисления параметров электромагнитного поля, распространяющегося сквозь слои ионосферной плазмы Земли по трассе от точки излучения до точки расположения экрана. В ней используется математический аппарат, описывающий распространение электромагнитных волн в среде слоисто-неоднородной плазмы посредством решения системы уравнений Максвелла в одномерной постановке. Вторая методика заключается в определении характеристик электромагнитного поля, проникающего через щелевую неоднородность в электромагнитном экране. Данная задача относится к типу дифракционных задач, решаемых методом интегрального уравнения, эквивалентного уравнению Поклингтона, описывающего распределение магнитных токов, возбуждаемых сторонним электромагнитным полем в плоскости неоднородности.

С использованием разработанного комплекса методик исследованы характеристики сверхширокополосного электромагнитного импульса, проникающего через щелевые неоднородности электромагнитного экрана в среде ионосферной плазмы Земли.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, ионосферная плазма, электромагнитный экран.

За последние полвека достигнут значительный прогресс в понимании процессов влияния импульсных электромагнитных полей на электрические системы и оборудование, а также способов снижения этого влияния [1–3]. Также немаловажными являются вопросы влияния электрофизических параметров среды, в которой происходит распространение воздействующего на объект импульса. Так, анализ ряда источников [2, 3] показывает, что прохождение электромагнитного импульса сквозь слои ионосферной плазмы Земли приводит к разрушению его амплитудно-временной формы, он растягивается во времени, уменьшает свою амплитуду, меняется его фазовая модуляция [4]. В связи этим представляет интерес вопрос о том, каковы характерные особенности воздействия искаженного ионосферной средой импульса на объекты, защищаемые экранированием, и каким образом эти особенности могут влиять на требования к защитным свойствам экранирующих корпусов в среде околоземного космического пространства. Проведение анализа воздействия электромагнитного импульса на объекты, находящиеся в ионосферной плазме, требует решения двух задач. Первая представляет собой задачу о прохождении импульсного поля сквозь ионосферную плазму Земли, а вторая – о его проникновении за защитный экран через щелевые отверстия.

Представленный в настоящей работе комплекс, состоящий из двух численных методик, позволяет решить описанные выше задачи и провести расчетное изучение характеристик сверхширокополосного электромагнитного импульса, проникающего через щелевые неоднородности электромагнитного экрана в среде ионосферной плазмы Земли.

При разработке комплекса методик был сделан ряд допущений. В первой из методик при расчёте распространения импульса вдоль вертикальной трассы Земля-ионосфера рассматриваются условия, наиболее благоприятные для распространения радиочастотного излучения, при которых влиянием геомагнитного поля можно пренебречь. На практике эта ситуация может быть реализована при излучении линейно поляризованной волны в направлении, поперечном геомагнитному полю, где электрическая компонента излучаемого поля совпадает по ориентации с вектором геомагнитного поля. В этом случае среду распространения можно рассматривать как изотропную с постоянной магнитной и зависящей от высоты диэлектрической проницаемостями. Во второй методике введены допущения об идеальной проводимости стенок экранирующих корпусов. Обе методики имеют погрешности, обусловленные пространственно-временной дискретизацией величин, участвующих в расчетах.

При проведении расчётов исходный импульс в комплексе методик представляется в виде массива значений его амплитуды, упорядоченных относительно шкалы времени с постоянным шагом. Для анализа импульса применяется разложение в ряд Фурье с использованием дискретного преобразования, результатом которого является массив коэффициентов разложения E_{ω}^n по гармоникам $\omega_n = 2(n-1)\pi/T$ ($n = 1, 2, \dots, N_{\omega} + 1$), где T – временной интервал, во много раз (100 и более) превышающий длительность импульса, N_{ω} – количество разбиений исходного импульса по гармоникам, выбираемое так, чтобы иметь возможность с достаточной точностью описать фронт сверхширокополосного импульса. В частных случаях может использоваться быстрое преобразование Фурье.

Дальнейшие расчёты проводятся для каждой из частот разложения $\omega = \omega_n$ по отдельности.

В первой методике рассматривается преобразование импульса при прохождении через ионосферную плазму. Для анализа процесса распространения электромагнитной волны через ионосферу расчетная область на интервале от 0 до ∞ по высоте делится на N_s не обязательно равных слоев (последний слой полубесконечный). Данное разбиение имеет N_s-1 границ с координатами $R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_{N_s-1}$. При допущении, что электрофизические характеристики каждого j -го слоя постоянны и характеризуются магнитной проницаемостью μ_0 и диэлектрической проницаемостью ε_j , определяемой по формуле:

$$\varepsilon_j = \varepsilon(R_j) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{e^2 N_{e,j}}{m_e \varepsilon_0 i \omega (i \omega + \nu_{ef,j})} \right),$$

где m_e – масса электрона; e – заряд электрона; $N_{e,j}$ – концентрация электронов в j -м слое; $\nu_{ef,j}$ – эффективная частота столкновений в j -м слое, ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме [5], уравнения Максвелла для каждого слоя в сферической системе координат в частотном представлении имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_{\phi}^j) &= i \omega \mu_0 H_{\theta}^j, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_{\theta}^j) &= i \omega \varepsilon_j E_{\phi}^j, \end{aligned} \quad (1)$$

где r – расстояние от точки излучения. E_{ϕ} , H_{θ} – компоненты соответствующих векторов в сферических координатах. Введение обозначений:

$$\tilde{E}_{\phi}^j = r E_{\phi}^j, \quad \tilde{H}_{\theta}^j = r H_{\theta}^j$$

и выражение одной переменной через другую, позволяет получить уравнение для электрического поля:

$$\frac{\partial^2 \tilde{E}_{\phi}^j}{\partial r^2} + \gamma_j^2 \tilde{E}_{\phi}^j = 0, \quad \gamma_j = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_j}, \quad (2)$$

где γ_j – постоянная распространения в j -м слое.

Решение уравнения (2) имеет вид

$$\tilde{E}_{\phi}^j = C_1^j e^{-i\gamma_j r} + C_2^j e^{i\gamma_j r}.$$

Константы C_1^j и C_2^j характеризуют в слое падающую и отраженную волны. Их подстановка в исходные уравнения (1) для магнитного поля с учетом введённых обозначений даёт:

$$\begin{aligned}
E_{\varphi}^j &= \frac{C_1^j}{r} e^{-i\gamma_j r} + \frac{C_2^j}{r} e^{i\gamma_j r}, \\
H_{\theta}^j &= -\frac{C_1^j}{rW_j} e^{-i\gamma_j r} + \frac{C_2^j}{rW_j} e^{i\gamma_j r}, \\
W_j &= \sqrt{\mu_0/\varepsilon_j},
\end{aligned} \tag{3}$$

где W_j – волновое сопротивление j -го слоя.

В первом слое константа $C_1^1 = E_{\omega}^n$ характеризует исходную падающую волну. В последнем слое константа C_2 равна нулю ($C_2^{N_s} = 0$) т.к. он полубесконечен и отраженной волны не возникает. Остальные константы находятся из условия непрерывности E_{φ}^j и H_{θ}^j на каждой из границ. В итоге составляется система из $2N_s$ линейных алгебраических уравнений с $2N_s$ неизвестными:

$$\begin{aligned}
C_1^1 &= E_{\omega}^n, \\
C_1^j e^{-i\gamma_j R_j} + C_2^j e^{i\gamma_j R_j} - C_1^{j+1} e^{-i\gamma_{j+1} R_j} - C_2^{j+1} e^{i\gamma_{j+1} R_j} &= 0, \quad j=1..N_s-1, \\
-\frac{C_1^j}{W_j} e^{-i\gamma_j R_j} + \frac{C_2^j}{W_j} e^{i\gamma_j R_j} + \frac{C_1^{j+1}}{W_{j+1}} e^{-i\gamma_{j+1} R_j} - \frac{C_2^{j+1}}{W_{j+1}} e^{i\gamma_{j+1} R_j} &= 0, \quad j=1..N_s-1, \\
C_2^{N_s} &= 0,
\end{aligned} \tag{4}$$

решение которой позволяет определить неизвестные константы и в итоге поле во всей расчетной области.

Решение рассмотренных уравнений с использованием численных методов представляется затруднительным из-за больших значений величины в степени экспоненты. Для упрощения системы уравнений следует ввести замену переменных вида:

$$\begin{aligned}
C_1^j e^{-i\gamma_j R_{j-1}} &= \tilde{C}_1^j, \\
C_2^j e^{i\gamma_j R_{j-1}} &= \tilde{C}_2^j.
\end{aligned}$$

В этом случае система (4) примет вид:

$$\begin{aligned}
\tilde{C}_1^1 &= E_{\omega}^n, \\
\tilde{C}_1^j e^{-i\gamma_j (R_j - R_{j-1})} + \tilde{C}_2^j e^{i\gamma_j (R_j - R_{j-1})} - \tilde{C}_1^{j+1} - \tilde{C}_2^{j+1} &= 0, \quad j=1..N-1, \\
-\frac{\tilde{C}_1^j}{W_j} e^{-i\gamma_j (R_j - R_{j-1})} + \frac{\tilde{C}_2^j}{W_j} e^{i\gamma_j (R_j - R_{j-1})} + \frac{\tilde{C}_1^{j+1}}{W_{j+1}} - \frac{\tilde{C}_2^{j+1}}{W_{j+1}} &= 0, \quad j=1..N-1, \\
\tilde{C}_2^N &= 0,
\end{aligned} \tag{5}$$

а общее решение исходной системы уравнений (5) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
E_{\varphi}^j &= \frac{\tilde{C}_1^j}{r} e^{-i\gamma_j (r - R_{j-1})} + \frac{\tilde{C}_2^j}{r} e^{i\gamma_j (r - R_{j-1})}, \\
H_{\theta}^j &= -\frac{\tilde{C}_1^j}{rW_j} e^{-i\gamma_j (r - R_{j-1})} + \frac{\tilde{C}_2^j}{rW_j} e^{i\gamma_j (r - R_{j-1})}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Таким образом, значения амплитуд напряжённостей электрического и магнитного полей в любой из точек расчётной области вычисляются путем подстановки в (6) решения системы уравнений (5).

Полученные в первой методике данные используются в качестве исходных в методике расчёта прохождения излучения через щелевую неоднородность в экранирующем корпусе. Алгоритм расчёта основан на том, что падение плоской электромагнитной волны на объект, содержащий электрическую неоднородность в экранирующем корпусе, возбуждает в плоскости неоднородности Oxy магнитный ток \vec{J}^k , описываемый интегральным уравнением эквивалентным уравнению Поклингтона [6, 7, 8]:

$$\frac{i}{\omega\mu} (\text{grad div} + k^2) \int_S \vec{J}^k(p) \frac{\exp(-ikR(p,q))}{4\pi R(p,q)} dp = \vec{H}_\omega^k(q), \quad (7)$$

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{Ne \cdot e^2}{m_e(\omega^2 - \nu^2)} (1 + i\nu/\omega),$$

где \vec{H}_ω^n – вектор стороннего магнитного поля на частоте ω_k в точке q , принадлежащей плоскости неоднородности; $\vec{J}^k(p)$ – распределение вектора магнитного тока в плоскости неоднородности; $R(p,q)$ – расстояние от точки интегрирования p до точки наблюдения q ; S – площадь неоднородности; k – постоянная распространения; μ – абсолютная магнитная проницаемость среды (в ионосфере и атмосфере равняется магнитной проницаемости вакуума); ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, m_e – масса электрона, ν – эффективная частота столкновений, N_e – концентрация электронов.

Для расчета распределения составляющих магнитного тока в плоскости неоднородности Oxy вводится расчетная модель, подобная изображенной на рис. 1. Любая конфигурация неоднородности задается разбиением на N элементарных прямоугольных площадок с координатами верхнего левого угла x_i, y_i и размерами $\Delta x_i, \Delta y_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$). Толщина стенки экрана задается параметром Δz . В пределах каждой отдельной площадки искомое распределение магнитного тока полагается неизменным. На основе введенной расчетной модели составляется система из $2N$ линейных алгебраических уравнений с $2N$ неизвестными, описывающими искомое распределение составляющих магнитного тока по системе N площадок.

Вначале рассчитываются величины составляющих стороннего магнитного поля в плоскости неоднородности, характеризующие правую часть уравнения (7):

$$H_{\text{ox}}^{n,i} = H_\omega^n(r_i^*) \cos \varphi, \quad H_{\text{oy}}^{n,i} = H_\omega^n(r_i^*) \sin \varphi,$$

где r_i^* – радиус-вектор, определяющий центральную точку ($x_i^* = x_i + \Delta x_i/2$; $y_i^* = y_i + \Delta y_i/2$) i -ой площадки, φ – угол между плоскостью колебания магнитного поля и осью Ox .

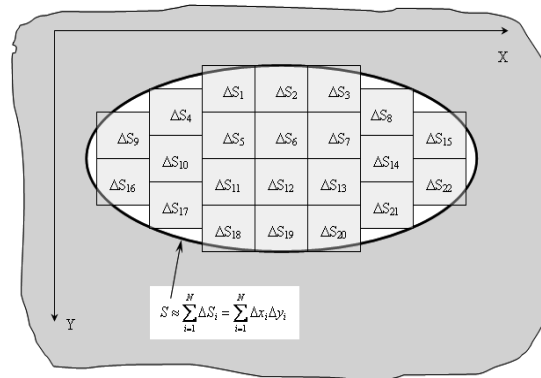


Рис. 1. Расчетная модель, позволяющая описать любую конфигурацию неоднородности разбиением на элементарные площадки

Далее рассчитываются коэффициенты $K_{i,j}^x$, $K_{i,j}^{xy}$ и $K_{i,j}^y$ матрицы для системы линейных алгебраических уравнений с применением процедур численного интегрирования:

$$K_{i,j}^x = \int_{x_j}^{x_j + \Delta x_j} \int_{y_j}^{y_j + \Delta y_j} \left[F_1(r_i) + (x_i^* - \xi)^2 F_2(r_i) \right] d\eta d\xi;$$

$$K_{i,j}^{xy} = \int_{x_j}^{x_j + \Delta x_j} \int_{y_j}^{y_j + \Delta y_j} (x_i^* - \xi)(y_i^* - \eta) F_2(r_i) d\eta d\xi;$$

$$K_{i,j}^y = \int_{x_j}^{x_j + \Delta x_j} \int_{y_j}^{y_j + \Delta y_j} \left[F_1(r_i) + (y_i^* - \eta)^2 F_2(r_i) \right] d\eta d\xi;$$

$$K_{i,j}^x = K_{j,i}^x, K_{i,j}^{xy} = K_{j,i}^{xy}, K_{i,j}^y = K_{j,i}^y;$$

$$F_1(r) = \frac{-1 - ikr + k^2 r^2}{r^3} e^{-ikr}; \quad F_2(r) = \frac{3 + 3ikr - k^2 r^2}{r^5} e^{-ikr};$$

$$r_i = \sqrt{(x_i^* - \xi)^2 + (y_i^* - \eta)^2 + (\Delta z/2)^2},$$

где r_i – расстояние между точкой наблюдения $(x_i^*; y_i^*)$ и точкой интегрирования $(\xi; \eta)$.

Здесь индекс i – номер очередного узла в приведенной системе, для которого удовлетворяется условие суперпозиции магнитных полей падающего и суммарного поля наводимого каждой j -ой площадкой всей системы разбиения неоднородности.

Решается система линейных алгебраических уравнений, представляющая собой $2N$ уравнений с $2N$ неизвестными:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^N [J_x^{n,j} K_{1,j}^x + J_y^{n,j} K_{1,j}^{xy}] = \frac{4\pi ik}{\sqrt{\epsilon/\mu}} H_{\omega,x}^{n,1}, \\ \sum_{j=1}^N [J_x^{n,j} K_{1,j}^{xy} + J_y^{n,j} K_{1,j}^y] = \frac{4\pi ik}{\sqrt{\epsilon/\mu}} H_{\omega,y}^{n,1}, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^N [J_x^{n,j} K_{i,j}^x + J_y^{n,j} K_{i,j}^{xy}] = \frac{4\pi ik}{\sqrt{\epsilon/\mu}} H_{\omega,x}^{n,i}, \\ \sum_{j=1}^N [J_x^{n,j} K_{i,j}^{xy} + J_y^{n,j} K_{i,j}^y] = \frac{4\pi ik}{\sqrt{\epsilon/\mu}} H_{\omega,y}^{n,i}, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^N [J_x^{n,j} K_{N,j}^x + J_y^{n,j} K_{N,j}^{xy}] = \frac{4\pi ik}{\sqrt{\epsilon/\mu}} H_{\omega,x}^{n,N}, \\ \sum_{j=1}^N [J_x^{n,j} K_{N,j}^{xy} + J_y^{n,j} K_{N,j}^y] = \frac{4\pi ik}{\sqrt{\epsilon/\mu}} H_{\omega,y}^{n,N}. \end{array} \right. \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Решение системы линейных уравнений может проводиться с использованием методов исключения Гаусса или LU-разложения матрицы коэффициентов. В рамках программной реализации на языке Fortran решение системы проводилось с использованием стандартной подпрограммы LSACG из библиотеки IMSL [9] с быстродействующим алгоритмом. Результатом является массив значений компонент $J_x^{k,j}$ и $J_y^{k,j}$, описывающих величины магнитных токов в каждой из N площадок системы.

Для расчета поля в заданной точке за экранирующей плоскостью производится суммирование импульсов от каждого из элементарных вибраторов (каждой из площадок неоднородности):

$$\begin{aligned} H_{\omega,x}^k(\tilde{r}) &= \frac{\sqrt{\epsilon/\mu}}{4\pi ik} \sum_{j=1}^N \int_{x_j}^{x_j+\Delta x_j} \int_{y_j}^{y_j+\Delta y_j} F_1(\tilde{r}_l) J_x^{k,j} + (\tilde{x} - \xi) F_2(\tilde{r}_l) \times \\ &\times [(\tilde{x} - \xi) J_x^{k,j} + (\tilde{y} - \eta) J_y^{k,j}] d\eta d\xi, \\ H_{\omega,y}^k(\tilde{r}) &= \frac{\sqrt{\epsilon/\mu}}{4\pi ik} \sum_{j=1}^N \int_{x_j}^{x_j+\Delta x_j} \int_{y_j}^{y_j+\Delta y_j} F_1(\tilde{r}_l) J_y^{k,j} + (\tilde{y} - \eta) F_2(\tilde{r}_l) \times \\ &\times [(\tilde{x} - \xi) J_x^{k,j} + (\tilde{y} - \eta) J_y^{k,j}] d\eta d\xi, \\ \tilde{r}_l &= \sqrt{(\tilde{x} - \xi)^2 + (\tilde{y} - \eta)^2 + (\tilde{z})^2} \end{aligned}$$

где ξ, η – переменные интегрирования.

Последним шагом методики является суммирование ряда Фурье. На основе массива амплитуд напряжённостей для отдельных гармоник вычисляется суммарный импульс на заданном расстоянии.

Результатом работы методики является массив значений компонент напряжённостей электрического и магнитного полей в заданной точке за экранирующей плоскостью. На основе рассмотренного алгоритма расчётов разработан набор программ на языке Fortran. Для проведения отдельных расчётов в программах использовались библиотека математических подпрограмм IMSL [9] и библиотека для организации параллельных вычислений MPICH.

В рамках тестирования результат работы методики распространения излучения в ионосфере Земли сопоставлялся с результатами аналитического решения, выведенного в [1] для распространения сверхширокополосного импульса на ионосферной трассе с постоянным значением концентрации частиц. Сопоставление результатов показало высокую степень совпадения.

Тестирование правильности вычислений для методики прохождения через щелевую неоднородность проводилось на экспериментальных кривых активной $R_{вх}$ и реактивной $X_{вх}$ составляющих входного сопротивления линейного вибратора (рис. 2), имеющего отношение длины плеча к диаметру равное 236 [10]. Результаты тестирования показывают хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными.

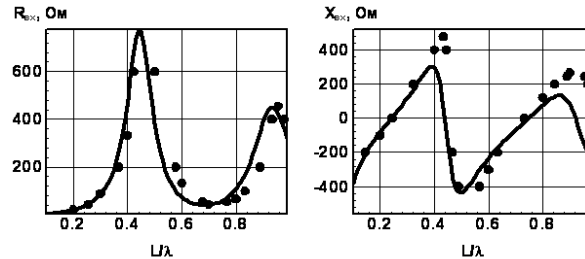


Рис. 2. Результаты тестирования правильности вычислений прохождения излучения через щелевую неоднородность (— — рассчитываемая величина, •••• — величина, полученная экспериментально)

Рассмотренный комплекс методик позволяет решать задачи о совместном действии на широкополосный импульс двух факторов. С практической точки зрения интерес представляет задача о сравнении преобразований амплитудно-временных форм при прохождении через щелевое отверстие для исходной формы сверхширокополосного (СШП) импульса и импульса, прошедшего через ионосферную плазму. Для этого в настоящей работе проведена попытка оценить эти последствия на примере расчетов характеристик СШП импульсов с амплитудно-временными формами I (рис. 3а) и II (рис. 3б), проникающих через щелевую неоднородность в защитном экране.

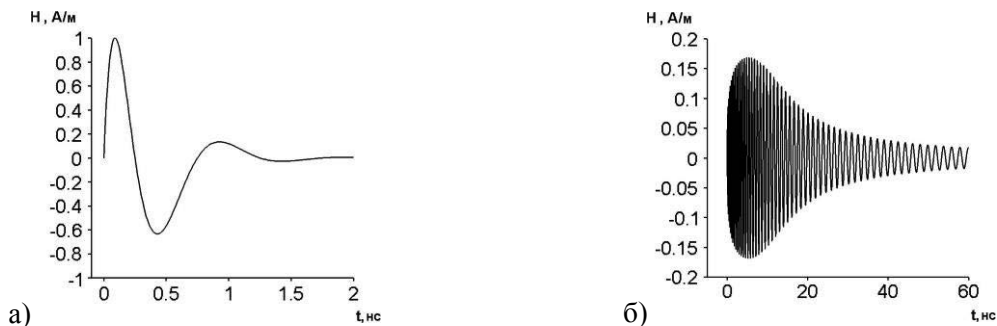


Рис. 3. Амплитудно-временные формы типового сверхширокополосного импульса до (а) (форма I) и после (б) (форма II) прохождения трассы 1000 км с параметрами $N_e = 10^5 \text{ см}^{-3}$, $\nu_y = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Авторами был проведён анализ особенностей проникновения импульсов формы I и II за экран для различных длин L и ширин d узкощелевой неоднородности. Точка наблюдения за экраном располагалась на удалении $Z = 0,5$ м от центра щели в направлении, перпендикулярном экрану. Схематическое изображение постановки задачи приведено на рис. 4.

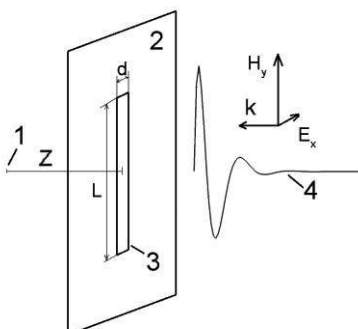


Рис. 4. Постановка задачи: 1 – точка приема импульса, 2 – бесконечно протяженный плоский металлический экран, 3 – щелевая неоднородность прямоугольной формы, 4 – падающий импульс

Следует отметить, что амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) приведенных на рис. 3а и рис. 3б импульсов практически совпадают (рис. 5). В отличие от импульса I, на графике АЧХ импульса II отсутствуют низкие частоты, для которых ионосфера непроницаема.

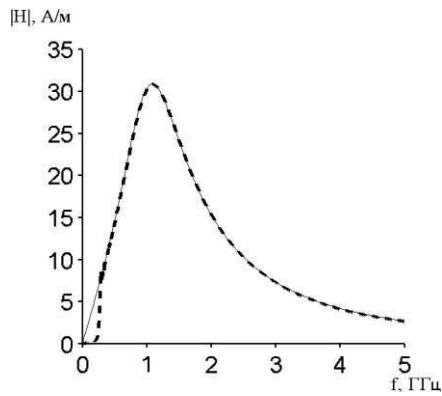
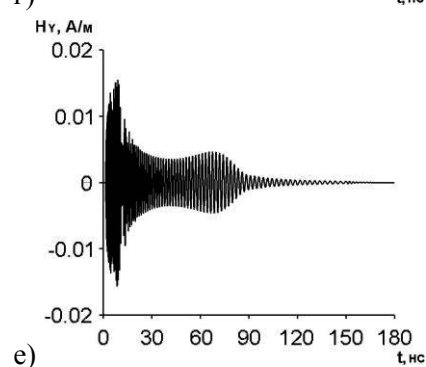
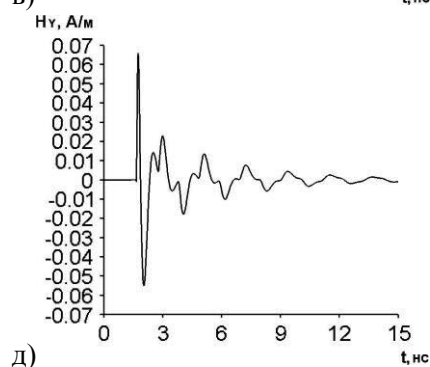
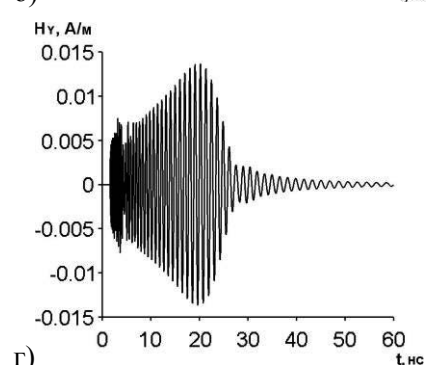
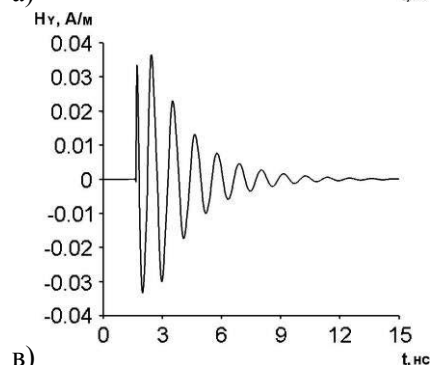
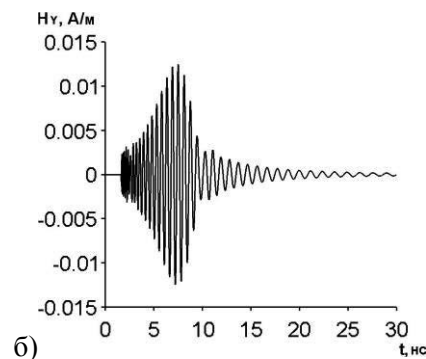
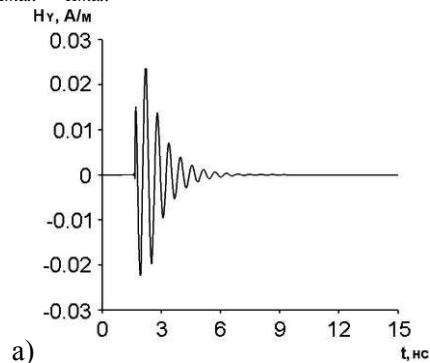


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики сверхширокополосных импульсов (— I, - - - - II)

В ходе исследований были построены графики амплитудно-временных (рис. 6) и амплитудно-частотных (рис. 7) зависимостей компонент магнитного поля СШП импульсов форм I и II после прохождения щелей различной длины.

Анализ графиков амплитудно-временных зависимостей (рис. 6) и энергий импульса, соответствующих этим зависимостям, показывает, что максимальная амплитуда и проходящая через отверстие энергия при прохождении щелевых отверстий с

длиной от 7,5 до 50 см растут с увеличением длины отверстия, но сам импульс при этом растягивается во времени. Стоит отметить, что при уменьшении длины щели уменьшается отношение максимальных амплитуд импульсов от их начальных форм I и II ($H_{I\max}/H_{II\max}$). Так, если для исходных амплитуд импульсов форм I и II оно составляет $H_{I\max}/H_{II\max} \approx 6$, то после прохождения щелевого отверстия длиной 50 см это соотношение становится равным $H_{I\max}/H_{II\max} \approx 4$, а при уменьшении щели до 7,5 см — $H_{I\max}/H_{II\max} \approx 2$.



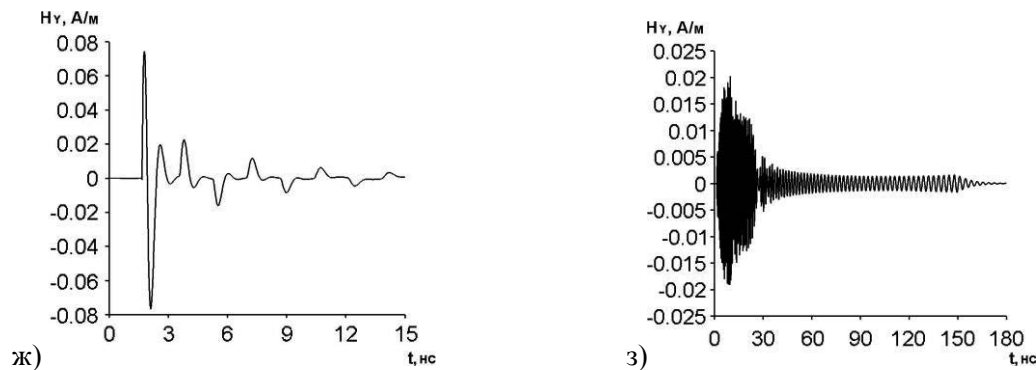


Рис. 6. Амплитудно-временные зависимости компонент магнитного поля СШП импульсов форм I – а, в, д, ж и II – б, г, е, з при прохождении щелей различной длины: 7,5 см – а, б, 15 см – в, г, 30 см – д, е, 50 см – ж, з

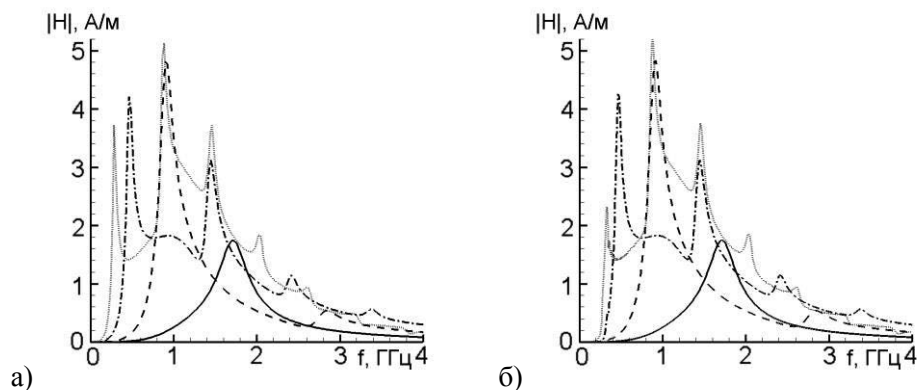


Рис. 7. Амплитудно-частотные зависимости компонент магнитного поля СШП импульсов форм I – а и II – б при прохождении щелей различной длины. (— — 7,5 см, - - - - - 15 см, - · - · - · - 30 см и ······· - 50 см)

Анализ графиков на рис. 7 показывает, что изменения АЧХ и, как следствие, энергий импульсов I-й и II-й формы после прохождения через щелевое отверстие, идентичны. Различия наблюдаются только для низких частот и связаны с изначальными различиями в АЧХ импульсов. На графиках присутствуют периодические локальные максимумы. Частоты этих максимумов можно примерно оценить по формуле $f_i = (i-0,5)c/L$.

Анализ расчетов характеристик СШП импульсов, проникающих через щелевую неоднородность в защитном экране, показал, что отношение энергий СШП импульсов I и II формы при прохождении их через щелевое отверстие меняется незначительно и остаётся примерно равным единице. При этом наблюдается сильное изменение отношения максимальных амплитуд этих импульсов. Разница в максимальной амплитуде импульсов форм I и II после прохождения через щелевую неоднородность уменьшается тем больше, чем меньше её длина.

Список литературы

1. Солдатов А.В., Терёхин В.А., Распространение сверхширокополосного электромагнитного сигнала в ионосферной плазме // Физика плазмы. – 2016. – Т. 42, № 10. – С. 927–935.
2. Гуляев Ю.В., Стрелков Г.М., Распространение сверхширокополосного радиоимпульса в холодной плазме // Доклады академии наук. – 2006. – Т. 408, № 6. – С. 754–757.
3. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф., Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13, № 4. – С. 270–322.
4. Желавский С.А., Коберник Д.А., Лебедев Н.В., Назаров С.А., Никольский В.А., Руденко В.В., Влияние возмущений концентрации заряженных частиц на распространение сверхширокополосного электромагнитного сигнала в ионосферной плазме // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 662. – С. 87–91.

5. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, 1973. – 272с.
6. Р Митра. Вычислительные методы в электродинамике. /пер. с английского под ред. Э.Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1977. – 487с.
7. Марков Г.Т. Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
8. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. Учеб. пособие для вузов. – М.: Советское радио, 1979.
9. Бартенев О.В. Фортран для профессионалов. Математическая библиотека IMSL. – М.: Диалог-МИФИ, 2000.
10. Техника сверхвысоких частот /Пер. с англ. под ред. Я.Н. Фельда – М.: Советское радио, 1952.

ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141300, ул. Весенняя, д. 2б.

Авторы

Лебедев Николай Вячеславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141300, ул. Весенняя, д. 2б. Тел. +79165696987, e-mail: leb_nick@mail.ru.

Назаров Сергей Алексеевич, младший научный сотрудник, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141300, ул. Весенняя, д. 2б. Тел. +79990954051, e-mail: 234.nazarov.sa@gmail.com.

Никольский Василий Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141300, ул. Весенняя, д. 2б. Тел. +79261485335, e-mail: va.nikolsky@gmail.com.

Lebedev N.V., Nazarov S.A., Nikol'skii V.A.

Complex of numerical procedures for calculating characteristics of the pulsed electromagnetic field penetrating through slot-hole heterogeneities of the electromagnetic shield in the Earth ionospheric plasma medium

Abstract. The article presents the complex of procedures for calculating characteristics of the pulsed electromagnetic field penetration through slot-hole heterogeneities of the electromagnetic shield in the Earth ionospheric plasma medium. The complex includes two calculation procedures. The first procedure is intended for evaluation of parameters of the electromagnetic field spreading through the layers of the Earth ionospheric plasma along the line from the radiation point to the shield location point. It applies a mathematical apparatus describing the electromagnetic waves spread in the medium of heterogeneous-layered plasma by means of the solution of Maxwell equation system in one-dimensional form. The second procedure consists in defining the characteristics of electromagnetic field penetrating through slot-hole heterogeneity in electromagnetic shield. The given problem concerns the type of diffraction problems solved by a method of integrated equation equivalent to Poklington equation describing the distribution of magnetic currents excited by an extraneous electromagnetic field in heterogeneity plane.

The developed procedure complex allowed to analyze the characteristics of super wide-band electromagnetic pulse penetrating through electromagnetic shield slot-hole heterogeneities in the Earth ionospheric plasma medium.

Key words: Electromagnetic pulse, ionospheric plasma, electromagnetic shield.

References

1. Soldatov A.V., Terehin V.A. *Rasprostranenie sverkhshirokopolosnogo elektromagnitnogo signala v ionosfernoi plasme* [Spreading of super wide-band electromagnetic signal in ionospheric plasma]. *Fizika plazmy – Plasma Physics*, 2016, vol. 42, no. 10, pp. 927-935. (In Russian)

2. Gulyaev Yu.V., Strelkov G.M., *Rasprostranenie sverkhshirokopolosnogo radioimpulsa v holodnoi plazme* [Spreading of super wide-band electromagnetic radio pulse in cold plasma]. *Doklady akademii nauk – Academy of Sciences reports*, 2006, vol. 408, no. 6, pp. 754-757. (In Russian)
3. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. *Sverkhshirokopolosnie signali i fizicheskie processy. 2. Metody analiza i primeneniye* [Super wide-band signals and physical processes. 2. Methods of analyze and application]. *Radiofizika i radioastronomiia – Radiophysics and radioastronomy*, 2008, vol. 13, no. 4, pp. 270-322. (In Russian)
4. Zhelavskii S.A., Kobernik D.A., Lebedev N.V., Nazarov S.A., Nikolskii V.A., Rudenko V.V., *Vliianie vozmushchenii koncentracii zariazhennikh chastits na rasprostranenie sverkhshirokopolosnogo elektromagnitnogo signala v ionosfernoi plazme* [Effect of perturbation charged-particle concentration for propagation of super wide-band signal in ionospheric plasma]. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo – Proceedings of A.F. Mozhaiskii Military-Space Academy*, 2018, vol. 662, pp. 87–91. (In Russian)
5. Gurevich A.V., Shvartsburg A.B. *Nelineinaya teoriya rasprostraneniya radiovoln v ionosfere* [Non-linear theory of ionospheric propagation of radio waves]. Moscow, Nauka, 1973, 272p. (In Russian)
6. Mitra R. *Computer techniques for electromagnetics*. New York, Pergamon press, 1973. (Russ. ed.: Burshtein E.L. *Vychislitel'nye metody v elektrodinamike*. Moscow, Mir, 1977, 487p.)
7. Markov G.T., Chaplin A.F. *Vozbuzhdeniye elektromagnitnykh voln* [Excitation of electromagnetic waves]. Moscow, *Radio i svyaz' – Radio and communication*, 1983, 296p. (In Russian)
8. Markov G.T., Petrov V.M., Grudinskaya G.P. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [electrodynamics and propagation of radio waves]. Moscow, *Sovetskoe radio – Soviet radio*, 1979. (In Russian)
9. Barten'ev O.V. *Fortran dlia professionalov. Matematicheskaya biblioteka IMSL* [Fortran for professionals. Mathematical library IMSL]. Moscow, Dialog-MIFI, 2000. (In Russian)
10. Very high frequency techniques engineering. (Russ. ed.: Fel'd Ya.N. *Tekhnika sverkhvysokikh chastot*. Moscow, Sovetskoe radio, 1952)

«Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation (FSFE «12 CSRI»), ul. Vesenniaia, 2b, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, 141307.

Authors

Lebedev Nikolai Viacheslavovich, candidate of science (tech.), senior researcher, «Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation; Vesenniaia, 2b, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, 141307. Tel. +79165696987, e-mail: leb_nick@mail.ru.

Nazarov Sergei Alekseevich, junior researcher, «Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation; Vesenniaia, 2b, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, 141307. Tel. +79990954051, e-mail: 234.nazarov.sa@gmail.com.

Nikolskii Vasilii Aleksandrovich, candidate of science (tech.), senior researcher, «Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation; Vesenniaia, 2b, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, 141307. Tel. +79261485335, e-mail: va.nikolsky@gmail.com.

УДК 537.876

Д.А. Коберник, В.А. Никольский, В.В. Руденко

Физическая модель для оценки параметров низкочастотного электромагнитного излучения в волноводе Земля-ионосфера, генерируемого токами в литосфере Земли

Рассматривается проблема, связанная с разработкой физических моделей для мониторинга сейсмической активности на основе регистрации низкочастотного излучения в волноводе Земля-ионосфера, обусловленного возникновением токов в недрах Земли накануне сильных землетрясений. Для оценки уровней низкочастотного излучения в волноводе Земля-ионосфера, разработана теоретическая модель, основанная на точном решении уравнений Максвелла через потенциалы Дебая в виде рядов по зональным гармоникам для слоисто неоднородной по высоте ионосферы и однородной Земли, в которой находится источник излучения в виде горизонтального электрического диполя. В результате расчетов, для различных глубин расположения источника излучения под поверхностью земли, получены значения электромагнитных полей в волноводе для широкого диапазона дискретных частот излучения. При генерации этого излучения исследовано влияние возникающих особенностей изменения Шумановских резонансов в волноводе Земля-ионосфера, позволяющее применить разработанный аппарат для мониторинга активных воздействий, обусловленных различными глобальными процессами в ионосфере и литосфере планеты.

Ключевые слова: волновод Земля-ионосфера, сейсмическая активность, Шумановские резонансы, уравнения Максвелла, зональные гармоники

Введение

Создание экспериментальных и теоретических методов исследования генерации, распространения и воздействия электромагнитного излучения на различную технику привело к созданию подходов, позволяющих решать ряд прикладных задач, в дополнение к направлениям исследований, ориентированных на изучение параметров ЭМИ ядерного взрыва и влияния взрывов на устойчивость дальних каналов управления и связи [1]. В данной работе рассматривается проблема, связанная с разработкой физических моделей для мониторинга сейсмической активности на основе регистрации низкочастотного излучения в волноводе Земля-ионосфера, обусловленного возникновением токов в литосфере Земли накануне сильных землетрясений. Взаимосвязь между аномальными всплесками низкочастотного электромагнитного излучения в волноводе Земля-ионосфера накануне сильных землетрясений с самими землетрясениями была замечена и исследуется с 70х годов прошлого века [2]. Исследования по мониторингу таких полей совместно с теоретической разработкой различных механизмов, позволяющих предсказывать подобные события, проводятся в таких странах как Россия, США, Китай и Япония. Эти исследования проводятся в сейсмоактивных зонах и сопровождаются наблюдением с целью слежения за движением коры, сейсмичностью, геомагнетизмом, грунтовыми водами, геохимией, выделением газов и т.п. Хотя проблема в настоящее время полностью не решена, считается [3, 4] что одним из индикаторов предвестников возможных землетрясений является появление в литосфере Земли токов с частотами в диапазоне геомагнитных пульсаций и в УНЧ/КНЧ диапазонах. Индуцированное протекающими в толще Земли токами низкочастотное излучение распространяется через грунт в волновод Земля-ионосфера. Поскольку в волноводе излучение на низких частотах распространяется с очень незначительным поглощением, то его регистрация возможна на значительных расстояниях от места расположения предполагаемого источника излучения. Электромагнитный мониторинг предвестников землетрясений дает надежду на создание системы их краткосрочного прогнозирования, а также позволяет проводить анализ и изучение основных механизмов

формирования и модуляции электромагнитных полей и токов в области возмущения на основе регистрации электромагнитных излучений в диапазоне УНЧ, КНЧ и частот геомагнитных пульсаций [5-7]. В последнее время интерес к исследованию возмущений параметров электромагнитных полей усиливается, в том числе, в связи с их чувствительностью к техногенным катастрофам, ядерным взрывам в различных средах и другим активным воздействиям на среду, связанным с деятельностью человека.

Существующие в настоящее время подходы для описания распространения низкочастотного излучения используют либо алгоритмы, основанные на численном 3-D решении уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD) [8, 9], либо точные решения в виде разложения в ряд по собственным функциям резонатора [10-13]. При этом, при использовании 3-D FDTD расчетной схемы, задействующей значительные машинные ресурсы, получается решение, содержащее сразу некоторый диапазон частот, что не всегда удобно. В тоже время основываясь на аналитическом решении уравнений Максвелла в сферической системе координат через потенциалы Дебая, для гармонических сигналов удается разделить переменные и представить решение в волноводе Земля-ионосфера и под поверхностью земли в виде ряда зональных гармоник, состоящих из функций Бесселя, полиномов Лежандра и тригонометрических функций от r , θ и φ [10]. Развитие этого подхода в рамках приближения, когда радиус Земли r_a много больше длины волны ($|kr_a| \gg 1$, где $k = \omega/c$ – волновое число, ω – круговая частота излучения, а c – скорость света), с использованием преобразования Ватсона позволило в работах [11, 12] представить решение в виде быстросходящегося ряда, получившего название метода мод. Метод мод нашел широкое применение при расчетах распространения радиоволн в СДВ диапазоне [11, 12]. Указанный подход в области низких частот, сопоставимых с нижними частотами собственных частот резонатора Земля-ионосфера (Шумановские резонансы), оказывается неприменим в силу того, что величина $|kr_a|$ становится сопоставимой или меньшей единицы. Таким образом, для решения задачи о мониторинге низкочастотного излучения, создаваемого заглубленным под поверхностью земли источником, оказывается применимым подход, заключающийся в непосредственном суммировании зональных гармоник. Такой подход использовался для исследования распространения радиоволн СНЧ/КНЧ диапазона от источника, находящегося в волноводе Земля-ионосфера, или ионосфере [14, 15]. На основании такого подхода можно получить ряд важных оценок применительно к находящимся в волноводе Земля-ионосфера источникам, моделирующим работу станций дальней низкочастотной связи, или ионосферным источникам, создаваемым с помощью радионагревных стенов. В частности, характеристики низкочастотного излучения на больших расстояниях от источника позволяют получить оценки, необходимые для его использования при поиске природных ископаемых и заглубленных объектов [15]. Несмотря на то что вычисление суммы в рядах, описывающих решение в этом диапазоне частот сопряжено с трудностью, обусловленной относительно медленной их сходимостью, разработанный алгоритм позволяет получить решение для случая верхней границы волновода, заданной в виде слоистой ионосферы с произвольным профилем диэлектрической проницаемости от высоты, путем точного суммирования ряда. Аналогичный подход использовался в работах [16, 17], однако ионосфера в этих работах рассматривалась как среда с независимыми от высоты параметрами. Особенностью рассматриваемой в данной статье задачи является применение метода, позволяющего учесть произвольный профиль зависимости свойств ионосферы от высоты для расположенного под поверхностью слоистой земли источника. Источник, моделирующий предвестник крупномасштабных геофизических процессов в виде землетрясений, описывается горизонтальным электрическим диполем. Данный подход не учитывает горизонтальную неоднородность среды, однако позволяет получить решение для дневных и ночных условий, являющееся точным решением системы уравнений Максвелла для данной заданной модели волновода. Получаемые в результате расчетов значения электромагнитных полей при сопоставлении с результатами натурных испытаний показывают удовлетворительное, достаточное для решения прикладных задач соответствие.

Нахождение компонент электромагнитного поля

В рассматриваемой постановке задачи Земля моделируется сферой с привязанной к ее центру сферической системой координат (r, θ, φ) , как показано на рис. 1. При $r > r_c$ расположена ионосфера, при $r < r_a$ грунт, а между Землей и ионосферой ($r_a < r < r_c$) находится воздух, заполняющий ионосферный волновод. Источник низкочастотного излучения моделируется горизонтальным электрическим диполем (ГЭД) с токовым моментом Idl , находящимся под поверхно-

стью земли в точке $r = r_b, \theta = 0, \varphi = 0$ на глубине $r_a - r_b$. Стенки волновода образованы Землей, характеризующейся постоянной комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , и неоднородной по высоте ионосферой. Диэлектрическую проницаемость воздуха ϵ_0 можно считать постоянной и равной единице. В ионосфере зависимость $\epsilon(r)$ определяется через концентрацию заряженных частиц и эффективное число их соударений с нейтральными молекулами в зависимости от высоты.

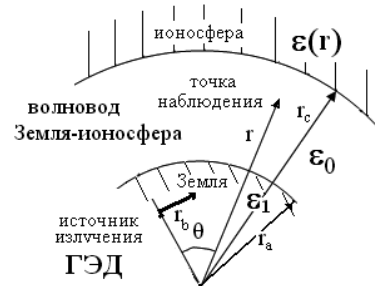


Рис. 1. Модель волновода Земля-ионосфера в сферической системе координат, привязанной к центру Земли с осью, проходящей через источник излучения в виде горизонтального электрического диполя

Необходимые для расчета $\epsilon(r)$ величины можно получить, используя, например, модель ионосферы IRI [14, 15].

Считая, что зависимость от времени имеет вид $e^{-i\omega t}$, для среды с $\epsilon = \epsilon(r)$, решение для компонент электромагнитного поля (описываемого векторами \vec{E} и \vec{H}) в каждом из рассматриваемых слоев выражается через потенциалы Дебая U и V [10]:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{1}{r} \Delta^* U = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta}) + \frac{1}{r \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2}, & H_r &= -\frac{1}{r} \Delta^* V, \\ E_\theta &= -\frac{1}{\epsilon r} \frac{\partial^2 (\epsilon r U)}{\partial r \partial \theta} + \frac{i\omega}{c \sin(\theta)} \frac{\partial V}{\partial \varphi}, & H_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rV)}{\partial r \partial \theta} + \frac{i\omega \epsilon}{c \sin(\theta)} \frac{\partial U}{\partial \varphi}, \\ E_\varphi &= -\frac{1}{\epsilon r \sin(\theta)} \frac{\partial^2 (\epsilon r U)}{\partial r \partial \varphi} - \frac{i\omega}{c} \frac{\partial V}{\partial \theta}, & H_\varphi &= \frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial^2 (rV)}{\partial r \partial \varphi} - \frac{i\omega \epsilon}{c} \frac{\partial U}{\partial \theta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где потенциалы Дебая удовлетворяют уравнениям:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial (\epsilon r U)}{\partial r} \right) + \frac{\Delta^* U}{r^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon U = 0, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rV)}{\partial r^2} + \frac{\Delta^* V}{r^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon V = 0. \quad (2)$$

Решение уравнений (2), удовлетворяющих свойствам периодичности, представимо в виде суммы слагаемых вида: $\exp(im\varphi) P_j^{lm}(\cos\theta) R_m(kr)$. Когда ϵ не зависит от r (в волноводе и под землей), радиальные функции выражаются через функции Бесселя аргумента kr с дробным индексом $(m+1/2)$. В результате, внутри волновода и под землей решение для потенциалов U и V представимо в виде рядов:

$$\sum_{j=0}^{\infty} \sum_{m=-j}^j e^{im\varphi} P_j^{lm}(\cos\theta) (A_j^m \psi_m(k_0 r) + B_j^m \xi_m(k_0 r)), \quad \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{m=-j}^j e^{im\varphi} P_j^{lm}(\cos\theta) C_j^m \psi_m(k_1 r), \quad (3)$$

где A_j^m, B_j^m, C_j^m – определяемые из граничных условий константы, а $\xi_n(x)$ и $\psi_n(x)$ [10] определяются через функции Бесселя $J_{n+1/2}(x)$ и Ханкеля $H_{n+1/2}^{(1)}(x)$: $\psi_n(x) = \sqrt{\pi x/2} J_{n+1/2}(x)$, $\xi_n(x) = \sqrt{\pi x/2} H_{n+1/2}^{(1)}(x)$,

$k_{0,1} = \omega \sqrt{\epsilon_{0,1}} / c$ - волновые числа в волноводе и под землей. Заметим, что структура ряда под землей автоматически удовлетворяет условию ограниченности решения при $r \rightarrow 0$. Для точечного подземного источника, моделируемого ГЭД, решение в виде рядов со структурой, аналогичной используемой в формуле (3), для соответствующих потенциалов $U_{ГЭД}, V_{ГЭД}$ имеет вид:

$$U_{\Gamma\text{ЭД}} = \frac{Idl \cos \varphi}{\omega r r_b \varepsilon_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \begin{cases} \xi'_n(k_1 r_b) \psi_n(k_1 r) P_n^1(\cos \theta), & r < r_b \\ \xi_n(k_1 r) \psi'_n(k_1 r_b) P_n^1(\cos \theta), & r > r_b \end{cases},$$

$$V_{\Gamma\text{ЭД}} = \frac{i Idl_e \sin \varphi}{\omega r r_b \sqrt{\varepsilon_1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \begin{cases} \xi_n(k_1 r_b) \psi_n(k_1 r) P_n^1(\cos \theta), & r < r_b \\ \xi_n(k_1 r) \psi_n(k_1 r_b) P_n^1(\cos \theta), & r > r_b \end{cases}. \quad (4)$$

Общее решение в области ионосферы (при $r > r_c$) также представимо в виде рядов, однако с радиальной функцией, являющихся решением уравнений второго порядка аналогичных нестационарному уравнению Шредингера для квантового осциллятора [10-12]. Общее решение для волнового уравнения в каждом из слоев состоит из решения однородного (3) и в случае наличия источника излучения неоднородного решения (4). Неизвестные постоянные, фигурирующие в решении, определяются из соотношений, записанных на границах слоев. Эти условия предполагают непрерывность касательных составляющих поля, что обеспечивается требованием непрерывности величин $\varepsilon r U$, $\varepsilon^{-1} \partial(\varepsilon r U) / \partial r$, $r V$, $\partial(r V) / \partial r$ на границах между слоями.

Интересующее нас решение в волноводе Земля-ионосфера может быть выражено через зависящие от номера моды n величины $\delta^n(r_c) = \dot{R}_n^1(r_c) / ik R_n^1(r_c)$ и ${}^1\delta_c^n(r_c) = ik_0 R_n(r_c) / \dot{R}_n(r_c)$ для потенциалов U и V соответственно, где функции $R_n^1(r)$ и $R_n(r)$ есть радиальные функции для указанных потенциалов в области ионосферы, а точка над значком функции обозначает дифференцирование по r . Используя уравнения для радиальных функций нетрудно установить, что величины $\delta^n(r)$ и ${}^1\delta_c^n(r)$ удовлетворяют нелинейным дифференциальным уравнениям первого порядка [11-13]:

$$\frac{d\delta_c^n(r)}{dr} + ik\delta_c^n(r)^2 + \frac{1}{ik} \left(k^2 \varepsilon(r) - \sqrt{\varepsilon(r)} \frac{d^2}{dr^2} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(r)}} - \frac{n(n+1)}{r^2} \right) = 0, \quad \delta_c^n = \delta_c^n(r_c),$$

$$\frac{d{}^1\delta_c^n(r)}{dr} = ik + \frac{({}^1\delta_c^n(r))^2}{ik} \left(k^2 \varepsilon(r) - \frac{n(n+1)}{r^2} \right) = 0, \quad {}^1\delta_c^n = {}^1\delta_c^n(r_c). \quad (5)$$

В качестве начального условия при интегрировании уравнений (5) в точке $r=r_1$, выбирается значение $\delta_c^n(r_1)$ или ${}^1\delta_c^n(r_1)$ в глубине ионосферы, где слои, лежащие выше r_1 , на поле в воздухе уже не влияют. При характерных для ионосферы зависимостях $\varepsilon(r)$ достаточно взять величину r_1-r_c не превышающую 20-40 км. Используя обозначения значений функций в точках $r=r_c$: $\psi_n(k_0 r_c) = \psi_n^c$, $\dot{\psi}_n(k_0 r_c) = \dot{\psi}_n^c$, $\dot{\xi}_n(k_0 r_c) = \dot{\xi}_n^c$, $\xi_n(k_0 r_c) = \xi_n^c$, и $r=r_a$: $\dot{\psi}_n(k_0 r_a) = \dot{\psi}_n^a$, $\psi_n(k_0 r_a) = \psi_n^a$, $\xi_n(k_0 r_a) = \xi_n^a$, $\dot{\xi}_n(k_0 r_a) = \dot{\xi}_n^a$, $\delta_a^n = ik_0 \dot{\psi}_n(k_1 r_a) / (k_1 \psi_n(k_1 r_a))$, для потенциалов Дебая U и V в волноводе Земля-ионосфера для ГЭД, находящегося под поверхностью земли, получим:

$$U = - \frac{i Idl \cos \varphi}{\omega r r_b \sqrt{\varepsilon_1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\dot{\psi}_n(k_1 r_b) (\psi_n^c - i\delta_c^n \psi_n^c) \xi_n(kr) - (\dot{\xi}_n^c - i\delta_c^n \dot{\xi}_n^c) \psi_n(kr)}{\Delta_n} P_n^1(\cos \theta),$$

$$V = - \frac{Idl \sin \varphi}{\omega r r_b \sqrt{\varepsilon_1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \frac{\psi_n(k_1 r_b) (\xi_n^c + i{}^1\delta_c^n \dot{\xi}_n^c) \psi_n(kr) - (\psi_n^c + i{}^1\delta_c^n \dot{\psi}_n^c) \xi_n(kr)}{{}^1\Delta_n} P_n^1(\cos \theta) \quad (6)$$

где обозначено:

$$\Delta_n = (\dot{\xi}_n^c - i\delta_c^n \dot{\xi}_n^c) (\dot{\psi}_n^a + i\delta_a^n \psi_n^a) - (\dot{\psi}_n^c - i\delta_c^n \psi_n^c) (\dot{\xi}_n^a + i\delta_a^n \xi_n^a),$$

$${}^1\Delta_n = (\xi_n^c + i{}^1\delta_c^n \dot{\xi}_n^c) (i\dot{\psi}_n^a / (\varepsilon_1 \delta_a^n) - \psi_n^a) - (\psi_n^c + i{}^1\delta_c^n \dot{\psi}_n^c) (i\dot{\xi}_n^a / (\varepsilon_1 \delta_a^n) - \xi_n^a).$$

Суммирование ряда вида (6) представляет собой достаточно сложную проблему для произвольных частот излучения и зависимостей диэлектрической проницаемости ионосферы от высоты [10-13]. Медленная сходимость рядов вида (3) является одним из ограничителей использования метода их вычисления путем непосредственного суммирования областью частот до нескольких кГц. В данном подходе для низких частот суммирование рядов (6) осуществлялось на ЭВМ с последующей подстановкой в формулы (1) для нахождения компонент электромагнитного поля. Для достижения необходимой точности использовался подход, основанный на специфической группировке функций ψ и ξ , определяемых через функции Бесселя. Аргумент этих функций $k_0 r$ в волноводе ($\varepsilon = 1$) изменяется от 0.134 для 1 Гц до 1340 для 10 кГц. В ионосфере и под поверхностью земли мнимая часть ε

много больше единицы, что существенно увеличивает аргумент $|kr|$ рассматриваемых функций в этих областях. Кроме того, поведение функций Бесселя существенно отличается для величины индекса большего или меньшего величины аргумента. Из сказанного следует, что для разных соотношений между индексом и аргументом рассматриваемых функций и диапазона изменения параметра аргумента (меньше, порядка или много больше единицы) приходится применять различные представления или асимптотики. В данном подходе для вычисления соответствующих членов ряда применялась группировка функций ψ и ξ , в основе которой лежит использование свойства функций Бесселя $J_{n+1/2}(x)$ быстро расти в зависимости от аргумента, а у функций Неймана $N_{n+1/2}(x)$ примерно с такой же скоростью убывать. При этом их произведение представляет собой функцию с относительно плавной зависимостью от аргумента и позволяет в случае задания его в виде отдельно заданной функции добиться необходимой точности при суммировании ряда. Для функций ψ и ξ для различных диапазонов изменения аргумента использовались разложение в степенной ряд, в виде интегрального представления и равномерного асимптотического разложения при больших значениях аргумента, в результате, представляющих собой систему накрывающихся асимптотик, позволяющую проводить тестирование в пересекающихся областях применимости.

Расчеты показывают, что общее количество слагаемых, необходимых для достижения заданной точности в указанном частотном диапазоне при суммировании ряда составляет $\sim 10^4$. При наличии ЭВМ суммирование указанного количества членов не приводит к существенным затратам расчетного времени. Следует отметить, что расчет задающих свойства ионосферы величин δ_c^n и ${}^1\delta_c^n$ удобнее проводить отдельно, путем численного решения нелинейных дифференциальных уравнений (5), например, методом Рунге-Кутты. При решении этих уравнений комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(r)$ определялась с использованием данных программы IRI. Существенно, что указанный подход позволяет, в отличие от численных методов, непосредственно получить решение в заданной точке в заданное время без расчета во всей области, т.е. аналитическое решение не использует предысторию процесса при вычислениях. Заметим, что при стремлении к минимуму находящихся в знаменателе формул (6) величин $|\Delta_n|$ и ${}^1|\Delta_n|$, в частотной зависимости для компонент поля будут наблюдаться максимумы в области частот от единиц до нескольких десятков Герц, соответствующих первым Шумановским резонансам. Частоты этих резонансов могут быть измерены экспериментально, а изменение свойств ионосферы, отвечающих за отражение излучения от верхней границы волновода, или подстилающей поверхности, отвечающей за отражение на границе волновод – поверхность Земли, вызывает их вариацию. В результате, измерение резонансных частот в низкочастотной области может быть использовано для мониторинга глобальных процессов, что и представляет определенный интерес к их исследованию.

Расчет компонент электромагнитного поля в волноводе

В расчетах будем моделировать распространение низкочастотного излучения от токовой системы, находящейся в литосфере Земли на глубинах до 30 км. Расчеты проводились для дневной и ночной моделей ионосферы и единичного электрического токового момента ($I dl = 1$ А/м). Расчет комплексной диэлектрической проницаемости грунтов проводился по формуле: $\varepsilon_1 = \varepsilon^1 + 4i\pi\sigma_1/\omega$, где диэлектрическая постоянная $\varepsilon^1=10$, а удельная проводимость $\sigma_1 = 10^{-4}$ См/м.

Считалось, что радиус Земли $r_a = 6370$ км, ионосфера имеет в дневных условиях высоту 60 км ($r_c = r_a + 60$ км), а в ночных 70 км. Вычисление комплексной диэлектрической проницаемости ионосферы $\varepsilon(r)$ проводилось исходя из зависимостей от высоты концентрации заряженных частиц и эффективного числа их соударений с нейтральными молекулами, показанных на рис. 2. Электрическое поле рассчитывалось в дБ по отношению к сигналу в 1 В/м, а магнитное в дБ по отношению к сигналу в 1 А/м. Прогнозирование уровней сигналов в волноводе предполагает получение зависимостей для различных компонент электромагнитного поля от расстояния до источника, расположенного на различных глубинах для диапазона частот от долей герц до нескольких сот герц.

Типичные результаты расчета компонент низкочастотного электромагнитного поля на поверхности Земли в зависимости от расстояния до источника $r_a\theta$, моделируемого ГЭД и находящегося под землей на глубине 10 км, приведены на рис. 3 и 4 для частот излучения 0,1 Гц, 1,0 Гц, 10 Гц, 100

Гц для угла $\varphi=\pi/4$. Зависимости компонент электрического поля E_r , E_θ , E_φ на поверхности Земли от расстояния $\theta_{га}$ представлены на рис. 3а и 3б, а компонент магнитного поля H_r , H_θ , H_φ на рис. 4а и 4б.

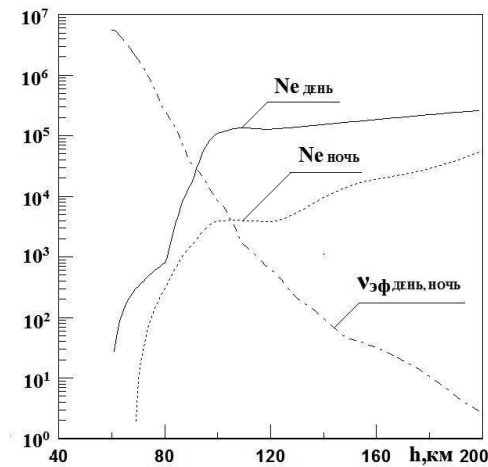


Рис. 2. Зависимость от высоты для дневной и ночной ионосферы концентрации заряженных частиц N_e и эффективного числа их соударений с нейтральными молекулами $v_{эф}$

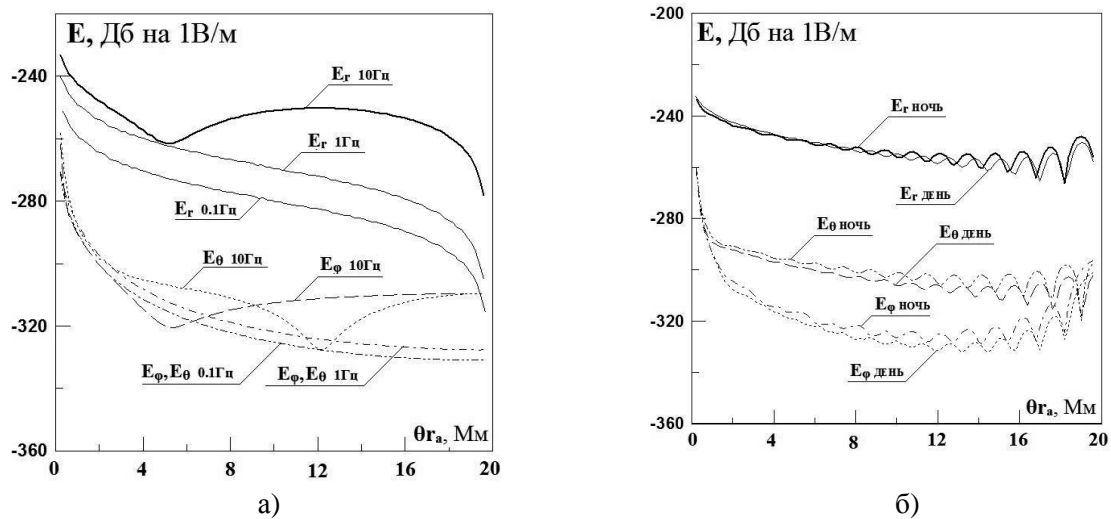


Рис. 3. Зависимость компонент электрического поля E_r , E_θ , E_φ на поверхности Земли от расстояния $\theta_{га}$ до источника излучения в виде ГЭД для дневных и ночных условий и частот а) 0,1 Гц, 1 Гц, 10 Гц и б) 100 Гц

Из графиков на рис. 3 и 4 видно, что число максимумов, имеющих место при прохождении излучения от места расположения диполя к противоположной точке Земли, примерно равно $|k_{орд}|$. В результате наблюдаются более десятка колебаний для частоты 100 Гц, и примерно один значительный экстремум у графика для частоты 10 Гц. Вблизи антипода амплитуда колебаний у всех компонентов сильно возрастает. На различных расстояниях от источника максимальные амплитуды поля на различных частотах имеют различное соотношение. На близких расстояниях самой большой будет амплитуда поля на частоте 100 Гц, а в дальней области на частоте 10 Гц.

При прохождении излучения по волноводу для источника в виде ГЭД доминирующими по величине являются компонента электрического поля E_r , и компоненты магнитного поля H_θ , H_φ , причем: $E_r \sim \cos \varphi$, $H_\theta \sim \cos \varphi$, $H_\varphi \sim \sin \varphi$. Распространение остальных компонент поля плохо поддерживается волноводом, а их амплитуды меньше указанных, больше чем на порядок. Для дневной ионосферы в ближней зоне для частот ~ 100 Гц графики зависимости амплитуд поля от расстояния лежат несколько выше, чем для ночной ионосферы. При этом структура графика практически не меняется. Если располагать измерительные приборы на различных высотах над Землей в волноводом, то можно убедиться, что амплитуда поля изменяется в зависимости от высоты подъема в пределах нескольких

(порядка пяти) дБ. Для различных частот излучения эта оценка остается справедливой, причем соотношение между амплитудами для различных частот существенно зависит от расстояния, на котором проводится регистрация сигнала.

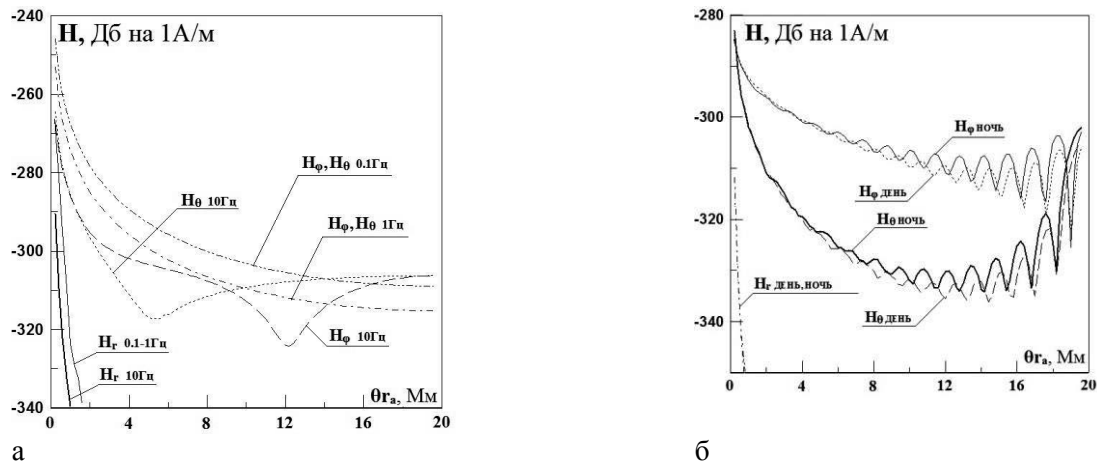


Рис. 4. Зависимость компонент магнитного поля H_r , H_θ , H_ϕ на поверхности Земли от расстояния θ_a до источника излучения в виде ГЭД для дневных и ночных условий и частот а) 0,1 Гц, 1 Гц, 10 Гц и б) 100 Гц

Зависимость амплитуды сигнала в волноводе на поверхности земли от глубины нахождения ГЭД под землей для компоненты магнитного поля H_ϕ , продемонстрирована на рис. 5 для глубин 5 км, 10 км, 15 км, 20 км и 30 км и частоты излучения 100 Гц. Видно, что характер поведения зависимостей компоненты H_ϕ от расстояния сохраняется, однако существенно ослабевает при расположении источника на большей глубине. Зависимость амплитуды сигнала от высоты расположения точки измерения в волноводе на расстоянии 2000 км от точки нахождения вертикали, проходящей через ГЭД, и находящийся на глубине 10 км, показано на рис. 6. Расчеты приведены для частот излучения 1 Гц, 10 Гц, 100 Гц для угла $\varphi = \pi/4$. Эта зависимость достаточно слабая для всех частот излучения, что говорит о возможности регистрировать сигнал практически на произвольной высоте.

Поскольку в области низких частот волновод Земля-ионосфера имеет резонансные частоты (Шумановские резонансы), то на этих частотах происходит некоторое усиление сигнала, генерируемого расположенным под поверхностью земли источником. Измеренные в спектре атмосферных шумов первые Шумановские резонансы примерно равны: $f_1 = 7,5$ Гц, $f_2 = 14,5$ Гц, $f_3 = 20,5$ Гц. График частотной зависимости амплитуд электромагнитных волн для диапазона частот от 1 Гц до 30 Гц для ночных и дневных условий излучения показан на рис. 7. Результаты представлены для компоненты поля E_r , возбужденной подземным ГЭД, расположенным на глубине 10 км и на расстоянии 1000 км по поверхности Земли от вертикали, проходящей через источник. Резонансы четко прослеживаются на графиках всех компонент электромагнитного поля. При этом для различных компонент и расстояний от источника амплитуды в зависимости от частоты могут, как расти, так и убывать.

На рис. 8 представлена частотная зависимость для компоненты поля E_r для тех же условий, при которых построены графики на рис. 7, однако, для частотного диапазона до 200 Гц, причем точка приема находилась на расстоянии 10 Мм, 15 Мм и 20 Мм от вертикали, проходящей через источник. Из графиков непосредственно следует, что размах амплитуды колебаний наиболее значителен в области первых Шумановских резонансов и с ростом частоты и номера резонанса убывает. Из графиков на рис. 7 видно, что изменение условий распространения в виде день-ночь приводит к сдвигу резонансов в диапазоне порядка 1 Гц. Из графика в ночных условиях значения этих резонансов равны соответственно: $f_1 = 7,9$ Гц, $f_2 = 14,7$ Гц, $f_3 = 20,7$ Гц, а в дневное время: $f_1 = 7,3$ Гц, $f_2 = 13,6$ Гц, $f_3 = 20,5$ Гц и примерно соответствуют измеренным экспериментально. Резонансные частоты для ночной ионосферы несколько больше, чем для дневной. Из расчетов следует, что они зависят от высоты волновода, что подразумевает их вариацию при изменении условий день-ночь или при активных воздействиях на ионосферу, например, ядерных взрывов [13]. Изменения резонансных частот во время активных воздействий обусловлены дополнительной ионизацией ионосферы,

приводящей к опусканию верхней границы волновода на величину сопоставимую с глубиной, имеющей место при переходе терминатора день-ночь.

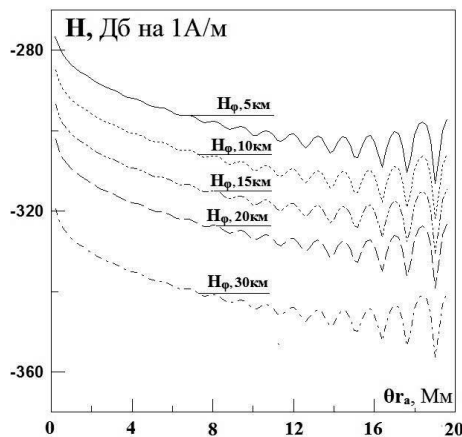


Рис. 5. Зависимость компоненты магнитного поля H_ϕ на поверхности Земли от расстояния θr_a для различных глубин залегания источника излучения

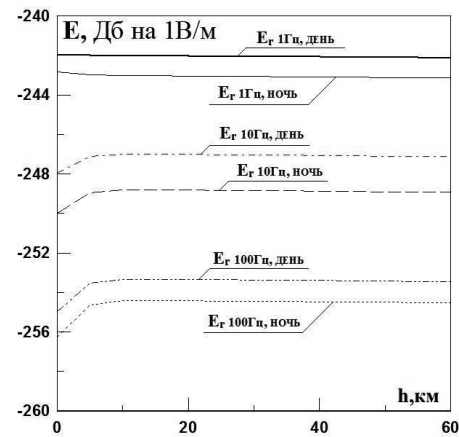


Рис. 6. Зависимость компоненты электрического поля E_r от высоты h регистрации сигнала в волноводе

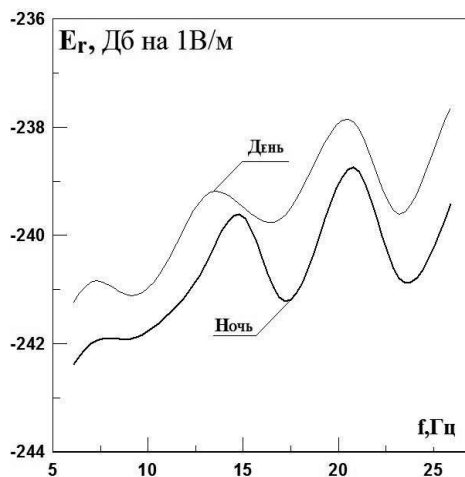


Рис. 7. Изменение амплитуды поля E_r в зависимости от частоты излучения в точке на поверхности Земли и расстоянии 1000 км от вертикали, проходящей через находящийся на глубине 10 км источник

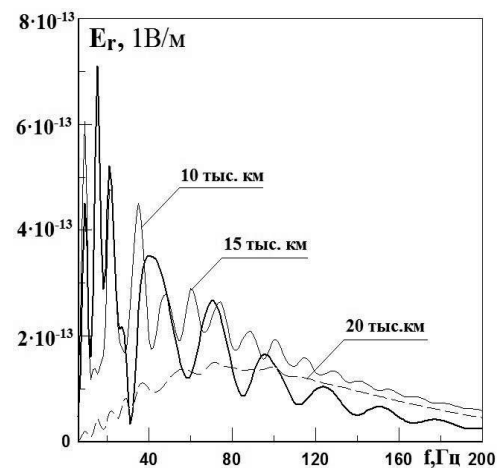


Рис. 8. Изменение амплитуды поля E_r в зависимости от частоты излучения в точке на поверхности Земли на расстояниях 10 Мм, 15 Мм и 20 Мм от вертикали, проходящей через находящийся на глубине 10 км источник

Выводы

Для теоретической оценки параметров низкочастотного излучения в волноводе Земля-ионосфера, инициированного сейсмической активностью, разработана модель и получен ряд модельных расчетов электромагнитных полей, генерируемых находящимся под поверхностью земли низкочастотным источником в виде горизонтального электрического диполя. В рассматриваемой модели через потенциалы Дебая получено точное решение уравнений Максвелла в волноводе Земля-ионосфера, представляющее собой ряд по зональным гармоникам для слоисто неоднородной по высоте ионосферы и однослойной земли, в которой и находится источник излучения. Разработанный алгоритм позволяет добиться сходимости ряда и получить значения электромагнитных полей в волноводе на произвольных расстояниях от источника излучения, для широкого диапазона дискретных частот излучения и различных глубин расположения источника под поверхностью земли, что указывает на высокую эффективность созданного аппарата для решения задач по предсказанию сейсмической активности. Дополнительные возможности, связанные с исследованием особенностей изменения Шумановских резонансов, позволяют разработать и применить этот аппарат для мониторинга

активных воздействий, обусловленных различными глобальными процессами в ионосфере и литосфере планеты.

Список литературы

1. Физика ядерного взрыва: В 2 т. Том 2. Действие взрыва. – Министерство обороны Российской Федерации. Центральный физико-технический институт. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 156 с.
2. Adachi S. Signal processing and sonification of electromagnetic radiation in the ELF band. - IEICE Trans. Fundam, Electron Commun. Comput. Sci. – 2002. - Vol. E84. - P. 1011–1016.
3. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., and Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. - Rev. Geophys. – 1993. – V. 31. – P. 117–132.
4. Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. - Surv. Geophys. – 1997. – Vol. 18. – P. 441–475.
5. Fraser-Smith A.C., Bernardi A. et al. Low-frequency magnetic fields measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. Geophys. Res. Lett. – 1990. – V. 17. – P. 1465–1468.
6. Hayakawa M., Yoshino T., Morgounov V.A. - Phys. Earth Planet. Inter. – 1993. – V. 77. – P. 97.
7. Бучаченко А.Л., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Сорокин В.Н., Страхов В.Н., Чмырев В.М. Ионосферные предвестники землетрясений. – УФН. – 1996. - т. 166. - № 9. - С. 1023–1029.
8. Simpson J. J. and Taflove A. Electrokinetic effect of the Loma Prietaearthquake calculated by an entire-Earth FDTD solution of Maxwell's equations. - Geophys. Re. Lett. – 2005. - Vol. 32. – P. L09302.
9. Simpson J. J. Global FDTD Maxwell's equations modeling of electromagnetic propagation from currents in the lithosphere. - IEEE Trans. Antennas Propag. – 2008. - Vol. 56. - No. 1. - P. 199–203.
10. Фок В.А. Дифракция радиоволн вокруг земной поверхности. - М.: Изд. АН СССР. - 1946. – 518с.
11. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. - М.: Наука, 1991. - 197 с.
12. Краснушкин П. Е. Решение краевой задачи распространения радиоволн вокруг Земли с учетом основных географических факторов. – ДАН СССР. – 1961. – Т. 138. – № 5; – Т. 139. – № 1; –Т. 140. – № 4.
13. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера. – Киев.: Наукова думка, 1977. – 200 с.
14. Коберник Д.А., Руденко В.В. Исследование электромагнитных полей в волноводе Земля-ионосфера, иницированных активным воздействием на ионосферу нагретых стенов, для оценки устойчивости работы радиоканалов. - Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – В 3. – С. 63–71.
15. Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В. Возмущение низкочастотных электромагнитных полей в волноводе земля-ионосфера заглубленной под поверхность земли сферической неоднородностью. - Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 9–18.
16. Wang Y. X., Fan W. S., and Pan W. Y. et al. Spherical harmonic series solution of fields excited by vertical electric dipole in earth-ionosphere cavity. - Chinese J. Radio Sci. – 2007. – Vol. 22. – No. 2. – P. 204–211.
17. Wang Y. X., Jin R.H., Geng J.P., Liang X.L. Exact SLF/ELF Underground HED Field Strengths in Earth-Ionosphere Cavity and Schumann Resonance. - IEEE Trans. Antennas Propag. – 2011. – Vol. 59. – № 8. – P. 3031–3039.

ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, д. 2б.

Авторы

Коберник Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник лаборатории, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, д. 2б. Тел. +79852592977.

Никольский Василий Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, д. 2б. Тел. +79852592977.

Федерации (12 ЦНИИ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, д. 26. Тел. +79261485335.

Руденко Виталий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (12 ЦНИИ МО РФ); Российская Федерация, г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя, д. 26. Тел. +79153080616.

Kobernik D.A., Nikolskiy V.A., Rudenko V.V.

Physical Model for Registration of Low-frequency Electromagnetic Radiation in Earth-ionosphere Waveguide Generated by Currents in the Earth Lithosphere

Abstract. The problem related to development of physical models for monitoring of seismic activity on the basis of registrations of low-frequency radiation in the Earth-ionosphere waveguide, caused by occurrence of currents in the Earth crust on the eve of the strong earthquakes is considered. For a theoretical estimate of levels of low-frequency radiation in the Earth-ionosphere waveguide, is developed the theoretical model on the basis the exact solution of Maxwell equations through the Debye potentials in the form of rows of spherical harmonic series for nonuniform on height ionosphere and the homogeneous Earth in which there is a source of radiation in the form of a horizontal electric dipole. As a result of calculations for various depths of source radiation arrangement under the earth surface values of electromagnetic fields in a waveguide for a wide range of discrete frequencies of radiation are calculated. The developed characteristics the properties of Schumann's resonance variations in a waveguide allow to develop and apply this model for monitoring of active actions caused by different global processes in an Earth ionosphere and lithosphere.

Key words: Earth-ionosphere waveguide, seismic activity, Schumann resonance, Maxwell electromagnetic field equation, spherical harmonic series

References

1. *Phizika yadernogo vzriva: In 2 t. Tom 2. Deyctvie vzriva.* – Ministry of Defense of Russia. Central Physica-technical Institute. – M.: Nauka. Phizmatlit. – 1997. – 156 c. (In Russian)
2. Adachi S., Signal processing and sonification of electromagnetic radiation in the ELF band. - *IEICE Trans. Fundam, Electron Commun. Comput. Sci.* – 2002. – Vol. E84. – P. 1011–1016.
3. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., and Morrison H.F., Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. - *Rev. Geophys.* – 1993 – Vol. 31. – P. 117–132.
4. Johnston M.J.S., Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. - *Surv. Geophys.* – 1997. – V. 18. – P. 441–475.
5. Fraser-Smith A.C., Bernardi A. et al. Low-frequency magnetic fields measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. - *Geophys. Res. Lett.* – 1990. – V. 17. – P. 1465–1468.
6. Hayakawa M., Yoshino T., Morgounov V.A. - *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1993. – V. 77. – No. 97.
7. Buchaenko A.L., Oraevskiy V.N., Pohotelov O.A., Corokin V.N., Ctrahov V.N., Chmirov V.M. Ionosphernie predvestniki zemletryceni. – *UFN.* - 1996. - Vol. 166. – No. 9. – P. 1023–1029. (In Russian)
8. Simpson J. J., Taflove A. Electrokinetic effect of the loma prietaearthquake calculated by an entire-earth FDTD solution of Maxwell's equations. - *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – P. L09302.
9. Simpson J. J. Global FDTD Maxwell's equations modeling of electromagnetic propagation from currents in the lithosphere. - *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2008. - Vol. 56. – No. 1. – P. 199–203.
10. Fok V.A. Diffraction of Radiowaves about the Earth's Surface. - *Izd. AN SSSR, Moscow, 1946.* (in Russian)
11. Makarov G.I., Novikov C.T., Ribachek S.T. Electromagnetic waves propagation over the Earth's surface. – Moscow: Nauka, 1991. (In Russian)
12. Kracnushkin P.E. Reshenie kraevoiy zadachi rasprostrnenia radiovoln vokrug Zemli s ychetom osnovnih geographicheckih faktorov. – *DAN USSR.* – 1961. – Vol. 138. – No. 5; Vol. 139. – No. 1; Vol. 140. – No. 4. (In Russian)

13. Bliokh P.V., Nikolaenko A.P., Philipov Yu.F. Global Electromagnetic Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity. - Naukova dumka, Kiev. – 1977. (In Russian)
14. Kobernik D.A., Rudenko V.V. Isledovdnie elektromagnitnih poleiy volnovoda Zemlia-ionocphera, iniciirovannih aktivnim vozdeictviem na ionocphery nagrevnih ctendov dly ocenki yctoichivocti raboti radiokanalov - Voprocii atomnoy nauki i tehniki. - 2010. – Vol. 3. – P. 63–71. (In Russian)
15. Kobernik D.A., Nikolsky V.A., Rudenko V.V. The effect of the excitation of low-frequency electromagnetic fields in an earth-ionosphere waveguide by a sub-surface buried spherical inhomogeneity. - Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advanced in Applied Physics). – 2016 – Vol. 4. – No. 1. – P. 9–18. (In Russian)
16. Wang Y. X., Fan W. S., and Pan W. Y. et al., Spherical harmonic series solution of fields excited by vertical electric dipole in earth-ionosphere cavity. – Chinese J. Radio Sci. – 2007. – Vol. 22. – No. 2. – pp. 204–211.
17. Wang Y. X., Jin R.H., Geng J.P., Liang X.L., Exact SLF/ELF Underground HED Field Strengths in Earth-Ionosphere Cavity and Schumann Resonance. - IEEE Trans. Antennas Propag. – 2011. – Vol. 59. – № 8. – pp. 3031–3039.

«Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» (FSFE «12 CSRI») of the Ministry of Defence of the Russian Federation

Authors

Kobernik Dmitriy A., candidate of science (tech.), head of laboratory, «Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» (FSFE «12 CSRI») of the Ministry of Defence of the Russian Federation, ul. Vesennyaya, 2b, Sergiev Posad-7, Moscow region, Russian Federation, 141307. phone: +7(495)-584-99-10.

Nikolsky Vaciliy A., candidate of science (tech.), senior researcher, «Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» (FSFE «12 CSRI») of the Ministry of Defence of the Russian Federation, ul. Vesennyaya, 2b, Sergiev Posad-7, Moscow region, Russian Federation, 141307. phone: +7(495)-584-99-10.

Rudenko Vitaliy V., candidate of science (phys. & math.), leading researcher, «Federal State Fiscal Establishment «12 Central Scientific Research Institute» (FSFE «12 CSRI») of the Ministry of Defence of the Russian Federation, ul. Vesennyaya, 2b, Sergiev Posad-7, Moscow region, Russian Federation, 141307. phone: +7(495)-584-99-10.

УДК 537.877

Е.Н. Бойко, Е.В. Иванов, В.С. Лопотов, В.Н. Попова

Расчетно-экспериментальные исследования по оценке параметров электромагнитного поля сверхкороткоимпульсных излучателей с учетом влияния подстилающей поверхности

В статье представлен алгоритм получения оценки характеристик сигнала сверхкороткоимпульсного излучателя с учётом отражения от поверхности грунта. Получена оценка амплитуды и формы сигнала в зоне приёмника в зависимости от поляризации излучателей и электрофизических характеристик грунта. Подобраны условия проведения экспериментальных работ с тем, чтобы прямой и отражённый сигналы были разнесены на время больше длительности импульса. Представлено обоснование схемы размещения измерительной аппаратуры для оценки параметров сверхкороткоимпульсного излучения. Приведена и объяснена осциллограмма зарегистрированного импульса в условиях открытой радиотрассы.

Ключевые слова: сверхкороткоимпульсный сигнал, ТЕМ-рупор, элементарный излучающий модуль, подстилающая поверхность, граница ближней зоны излучателя

Важной практической задачей является экспериментальная оценка параметров сверхкороткоимпульсных (СКИ) (длительностью от десятков пикосекунд до единиц наносекунд) электромагнитных полей (ЭМП) - амплитуды напряженности электрической составляющей ЭМП [1] и длительности импульсов. При проведении измерений в полевых условиях подстилающая поверхность (поверхность земли) влияет на результаты измерений. В настоящей работе в целях обеспечения объективной оценки параметров ЭМП с учетом влияния поверхности земли были обоснованы правила размещения измерительной аппаратуры относительно СКИ-излучателя [2].

Поскольку СКИ-излучатель располагается над поверхностью земли и излучает вдоль этой поверхности, уровень отраженного от поверхности земли сигнала может быть сопоставим с уровнем сигнала, пришедшего к приёмнику напрямую (рис. 1).

Для оценки амплитуды отраженного от поверхности земли сигнала при различной поляризации излучения и состояния грунта определим угол падения α и время задержки t_z отраженного от земли сигнала по отношению к сигналу, пришедшему к приемнику напрямую: $\alpha = \arctg\left(\frac{D}{h_1 + h_2}\right)$ и

$t_z = (S_2 - S_1)/c$, где c – скорость света, S_1 – кратчайший путь прохождения сигнала от излучателя к приёмнику, S_2 – путь отражённого от поверхности земли сигнала.

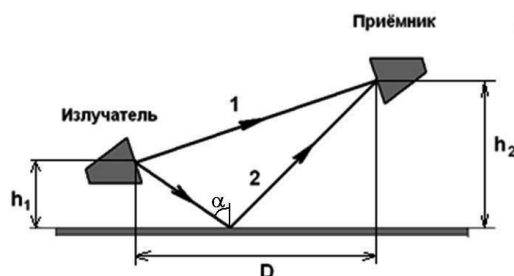


Рис. 1. Схема распространения сигнала (1 – кратчайший путь прохождения сигнала, 2 – путь отражённого от поверхности земли сигнала), h_1 , h_2 – высоты расположения излучателя и приёмника, D – расстояние между излучателем и приёмником вдоль поверхности земли

Расчет формы импульса сверхкороткой длительности в точке нахождения приёмника (рис. 1) проводился в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье. Коэффициенты

отражения от земной поверхности в зависимости от частоты, угла падения и от электрофизических характеристик (ЭФХ) грунта для вертикальной R_v (1) и горизонтальной R_h (2) поляризаций имеют вид [3,4]:

$$R_v = \frac{\varepsilon_g \left(1 + \frac{\sigma_g}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_g}\right) \cos(\alpha) - \sqrt{\varepsilon_g \left(1 + \frac{\sigma_g}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_g}\right) - \sin^2(\alpha)}}{\varepsilon_g \left(1 + \frac{\sigma_g}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_g}\right) \cos(\alpha) + \sqrt{\varepsilon_g \left(1 + \frac{\sigma_g}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_g}\right) - \sin^2(\alpha)}}, \quad (1)$$

$$R_h = \frac{\cos(\alpha) - \sqrt{\varepsilon_g \left(1 + \frac{\sigma_g}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_g}\right) - \sin^2(\alpha)}}{\cos(\alpha) + \sqrt{\varepsilon_g \left(1 + \frac{\sigma_g}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_g}\right) - \sin^2(\alpha)}}, \quad (2)$$

где: ε_0 – электрофизическая постоянная, ε_g и σ_g – относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость грунта, $\omega = 2\pi f$, f – частота.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости суммарного сигнала в точке нахождения приемника для исходных данных по поляризации СКИ-излучения и ЭФХ грунта в соответствии с табл. 1 при условии, что отраженный сигнал приходит с запаздыванием 1 нс.

Проведенные расчеты показали, что при горизонтальной поляризации электрического поля исходного сигнала амплитуда отраженного сигнала больше, чем при вертикальной. Амплитуда электрического поля отраженного сигнала также зависит от ЭФХ грунта и может достигать значения амплитуды основного сигнала.

Таблица 1

Электрофизические характеристики грунта и параметры сигнала, использованные в расчётах

№	Подстилающая поверхность			Поляризация исходного СКИ-сигнала
	Тип	Проводимость, См/м	Диэлектрическая проницаемость	
1	Исходный СКИ сигнал, высота размещения излучающей антенны, h_1 , 5 м,			
2	Влажная почва	10^{-2}	20	вертикальная
3				горизонтальная
4	Сухая почва	10^{-4}	5	вертикальная
5				горизонтальная
6	Морская вода	2	80	вертикальная
7				горизонтальная
8	Пресная вода	10^{-2}	80	вертикальная
9				горизонтальная

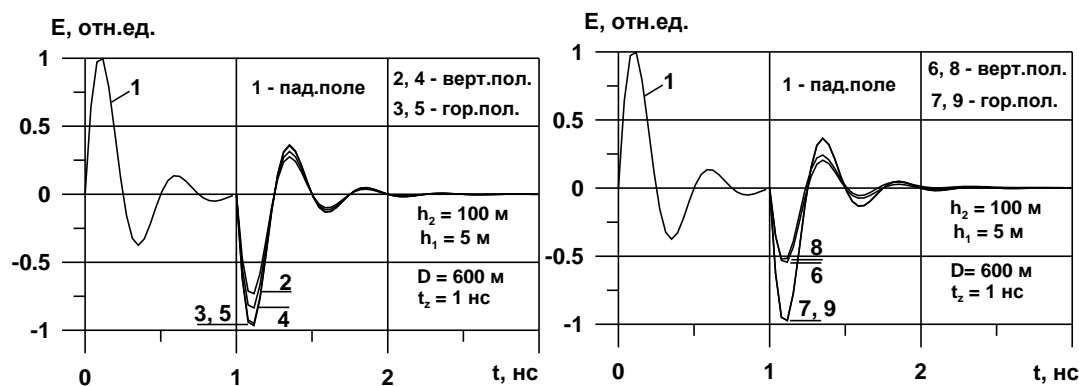


Рис. 2. Расчетные значения напряженности электрического поля в точке размещения измерительной антенны

Для того чтобы исключить влияние отражённого сигнала на основной, необходимо подобрать условия эксперимента таким образом, чтобы эти два сигнала были разнесены на время большее длительности импульса.

Учитывая форму и длительность импульса, оценим минимально достаточную разность хода упомянутых выше сигналов, позволяющую их различить. Для этого оценим пространственную длину импульса с известной длительностью. Например, импульс длительностью $\tau = 70$ пс имеет пространственную длину, равную $l = c \cdot \tau = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 70 \text{ пс} = 2,1 \text{ см}$. Соответственно, величина разности путей прохождения двух сигналов $\Delta l = S_2 - S_1$ должна удовлетворять условию $\Delta l > l = 2,1 \text{ см}$.

Полученное значение разности хода позволяет выбрать условия проведения эксперимента. Поскольку

$$S_1 = \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + D^2}, \quad (3)$$

где: h_1 – высота расположения излучателя, h_2 – высота расположения приёмника, D – расстояние между излучателем и приёмником вдоль поверхности земли,

$$S_2 = \sqrt{(h_2 + h_1)^2 + D^2}, \quad (4)$$

то

$$\Delta l = S_2 - S_1 = \sqrt{(h_2 + h_1)^2 + D^2} - \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + D^2} \quad (5)$$

и расстояние от излучателя до приёмника D определяется из условия:

$$\sqrt{(h_2 + h_1)^2 + D^2} - \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + D^2} > l, \quad (6)$$

где l – пространственная длина импульса с известной длительностью.

Поскольку измерительный канал имеет пределы измерения пиковой напряжённости электрической составляющей электромагнитного поля $E_1 \leq E_{\text{пр}} \leq E_2$, в которых значение напряжённости будет находиться в пределах допустимой погрешности, то существует и диапазон допустимых значений расстояний от излучателя до приёмника D .

Для оценки энергетических возможностей СКИ-источников излучения [5, 6] используют значение «показателя качества» FOM ¹ [7,8]. Тогда диапазон допустимых значений расстояний от излучателя до приёмника, который определяется регистрируемым датчиком, составит:

$$FOM/E_1 \leq D_{\text{пр}} \leq FOM/E_2. \quad (7)$$

Особенностью любого излучателя является существование ближней зоны, граница [9] которой L определяется из условия [10]:

$$L \leq 2d^2/\lambda, \quad (8)$$

где d – линейный размер антенны или антенной системы, λ – длина волны, соответствующая частоте максимума энергии спектра излучения ($\lambda = c/f_{\text{max}}$ для СКИ $f_{\text{max}} \sim 1/\tau$, здесь τ – длительность импульса). Для получения объективного результата измерения должны быть проведены только за пределами ближней зоны.

Таким образом, при проведении измерений расстояние D между излучателем и измерительным преобразователем выбирается с учётом:

- пространственной длины l импульса (выбирается исходя из требований к длительности неискажённого импульса);
- значения высоты расположения датчика регистрирующего прибора h_2 ;
- значения высоты расположения излучателя над поверхностью земли h_1 .

Например, для длительности импульса $\tau = 450$ пс (то есть $l = 0,135$ м), высоты расположения приёмника над уровнем земли $h_2 = 1,35$ м, высоты расположения излучателя $h_1 = 3,5$ м, из условия (6) получим ограничение для расстояния D :

$$D \geq \sqrt{\frac{l^2}{4} - h_1^2 - h_2^2 \left(1 - \frac{4h_1^2}{l^2}\right)} \approx 70 \text{ м}. \quad (9)$$

¹ FOM (Factor of merit) – «показатель качества», основной параметр СКИ-излучателей, равный произведению амплитуды напряжённости генерируемого электрического поля E (кВ/м) на расстояние R (м) до плоскости раскрытия антенны в пределах волновой зоны ($FOM = E \times R$)

На полученное значение расстояния D накладывается ограничение, связанное с пределами измерения регистрирующего датчика, а также ограничение ближней зоны излучателя. Представленные правила размещения измерительной аппаратуры относительно излучателя применены в ходе измерений параметров импульсного электромагнитного излучения СКИ-излучателя, представляющего собой генератор импульсных напряжений и антенную систему типа TEM -рупор [11] с величиной раскрытия $0,2 \times 0,2 \text{ м}^2$, размещённую на высоте $3,5 \text{ м}$. Предварительная оценка длительности импульса составляет $100\text{--}450 \text{ пс}$, FOM излучателя составляет порядка 10 кВ .

В ходе измерений параметров импульсного электромагнитного излучения СКИ-излучателя использовался измерительный преобразователь на основе полосковых линий (ИППЛ) [12, 13] (рис. 3), который минимально искажает форму измеряемого импульса сверхкороткой длительности за счет постоянства коэффициента преобразования в рабочем диапазоне частот. В ходе измерений ИППЛ располагался на оси симметрии излучателя.



Рис. 3. Внешний вид ИППЛ

Поскольку используемый измерительный канал способен регистрировать напряжённость поля в пределах $0,1 \leq E_{np} \leq 200 \text{ кВ/м}$, то для значения FOM излучателя 10 кВ диапазон значений расстояний для преобразователя составит:

$$0,05 \leq D_{np} \leq 100, \text{ м.} \quad (10)$$

Граница ближней зоны для TEM -рупора размером $0,2 \times 0,2 \text{ м}^2$ согласно формуле (8) составит:

$$L > \frac{2 \cdot 0,2^2}{3 \cdot 10^8 \cdot 450 \cdot 10^{-12}} = 5,6 \text{ м.} \quad (11)$$

Учитывая условия (9, 10, 11), определим диапазон допустимых значений расстояний D_0 от излучателя до приёмника:

$$70 \leq D_0 \leq 100, \text{ м,} \quad (12)$$

а также множество допустимых пространственных положений измерительного преобразователя относительно излучателя (рис. 4).

На рис. 5 представлена осциллограмма зарегистрированного электромагнитного импульса СКИ-излучателя.

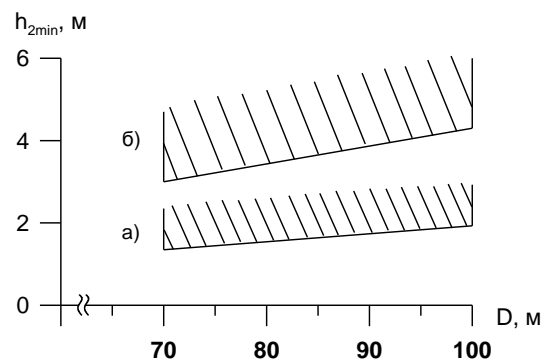


Рис. 4. Зависимость минимальной высоты расположения измерительного преобразователя над поверхностью земли h_{2min} от дальности его расположения от излучателя D , расположенного на высоте $h_1 = 3,5 \text{ м}$ (отмечена жирной линией). Косым штрихом обозначена область допустимых пространственных положений измерительного преобразователя относительно излучателя, обеспечивающих регистрацию неискажённого импульса длительностью: а) до 450 пс ; б) до 1 нс

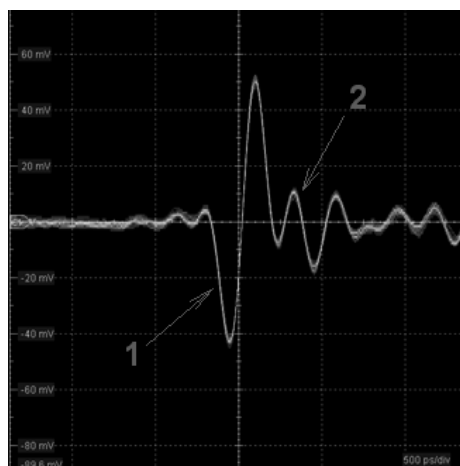


Рис. 5. Осциллограмма зарегистрированного импульса (1 – сигнал, пришедший к измерительному преобразователю по кратчайшей траектории, 2 – отражённый от поверхности земли инвертированный сигнал)

На представленной выше осциллограмме можно увидеть сигнал (с длительностью по полувысоте 120 пс), пришедший к измерительному преобразователю напрямую (сигнал с наибольшей амплитудой первого пика: 44 мВ), а также сигнал, отражённый от поверхности земли (инвертированный сигнал с амплитудой 12 мВ, отстающий от первого на 450 пс).

Таким образом, проведены расчетно-экспериментальные исследования по оценке параметров электромагнитного поля СКИ–излучателя в условиях открытой радиотрассы. Представлено обоснование правил размещения измерительной аппаратуры для оценки параметров излучения СКИ–излучателя с учётом влияния подстилающей поверхности (формулы 6, 7, 8). Указанные правила применены в ходе проведения трассовых измерений.

Список литературы

1. Красюк Н. П., Дымович Н. Д. Электродинамика и распространение радиоволн // Учебное пособие для радиотехнических вузов и факультетов. – М.: Высшая школа, 1974. – 536 с.
2. Осташев В. Е., Ульянов А. В. Сверхширокополосное излучение и угрозы его воздействия на электронные технические средства // Препринт ОИВТ РАН № 7-517. – М. – 2018. – 119 с.
3. Чёрный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Советское радио, 1962. – 480с.
4. Дж Джексон. Классическая электродинамика. – М.: Мир, 1965. – 702 с.
5. ГОСТ 51317 1.5 – 2009 (МЭК 61000-1-5: 2004). Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2009.
6. Иванов В. С. Достижения ВНИИОФИ в области изучения и метрологии электромагнитных импульсов / В.С. Иванов, Ю.М. Золотаревский, К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – № 2 (17). – С. 3–9.
7. Величенко В. П., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы / Под. общ. редакцией В.И. Кошелева. – Новосибирск: Наука. – 2015. – 483 с.
8. Белоконь И.Н., Гончаров А.Н., Иванов Е.В., Кудряшов А.С. Анализ технологий генерации мощного импульсного радиочастотного излучения и перспективы их развития // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. - №1(32). – С.49–57.
9. Кочержевский Г. Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
10. Физическая энциклопедия / Гл. ред. Прохоров А.М. в 5 т. Т.1 – М.: Советская энциклопедия, 1988. – С. 95.
11. Авдеев В. Б. Энергетические характеристики направленности антенн и антенных систем при излучении и приёме сверхширокополосных сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. – 2002. – №7(62). – С. 5.

12. Подосёнов С.А., Свекис Я.Г., Соколов А.А. Компактный полосковый измерительный преобразователь импульсного электромагнитного поля. – М.: Измерительная техника, № 4, 1994. – С.45–47.
13. <http://www.all-pribors.ru> (доступ 16.12.2019).

Федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская обл., г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя 2б, e-mail: fgu12tsnii@mail.ru.

Авторы

Бойко Евгений Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская обл., г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя 2б, e-mail: fgu12tsnii@mail.ru.

Иванов Евгений Викторович, кандидат технических наук, начальник лаборатории, федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская обл., г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя 2б, e-mail: fgu12tsnii@mail.ru.

Лопотов Валентин Сергеевич, младший научный сотрудник, федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская обл., г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя 2б, e-mail: fgu12tsnii@mail.ru.

Попова Вера Николаевна, старший научный сотрудник, федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская обл., г. Сергиев Посад, 141307, ул. Весенняя 2б, e-mail: fgu12tsnii@mail.ru.

Boyko E.N., Ivanov E.V., Lopotov V.S., Popova V.N.

Calculating and measuring conduction of electromagnetic field characteristics value of ultra short pulse radiators with underlying surface influence

Abstract. In this article the algorithm of receiving calculations of ultra short pulse radiation characteristics taking into account interface reflection is presented. Calculations of signal amplitude and its form in the receiver location depending on a radiators polarization and soil electrophysical characteristics are obtained. Experimental work conducting conditions have been selected to carry straight and reflected signals for more than a pulse duration time. The gaging equipment placement layout substantiation for a radiation characteristics value of ultra short pulse radiation is presented. The registered pulse oscillogram under open radio path conditions is presented and explained.

Key words: ultra short pulse, TEM horn antenna, elementary radiating unit, underlying surface, radiator nearby zone border.

References

1. Krasiuk N.P., Dimovich N.D. Electrodynamics and microwave propagation. // Textbook for the high school for radio engineering specialist - Moscow: Higher School Publ. – 1974. – 536 p. (in Russian).
2. Ostashev V.E., Ulyanov A.V. Ultra-wide band radiation and threats of its influence on electronic engineering means // Russia Academy Science no. 7-517. – Moscow. – 2018. – 119 p. (in Russian)
3. Cherny F.B. Microwave propagation. – Moscow: Soviet radio Publ. – 1962. – 480 p.
4. J. Jekson. Classical electrodynamics. – Moscow: Peace Publ. – 1965. – 702 p.

5. GOST 513171.5 – 2009 (MEK 61000-1-5: 2004) Electromagnetic Compatibility of Technical Means. – Moscow: – Standardinform. – 2009 (in Russian).
6. Ivanov V.S. VNIOOFI achievement in the area investigation and metrology electromagnetic impulses / V.S. Ivanov, Y.M. Zolotarevsky, K.Y. Sakharov, A.A. Sokolov // Technologies of electromagnetic compatibility, 2014, no. 2(17), pp. 3–9 (in Russian).
7. Velichenko V.P., Buynov Y.I., Koshelev V.I. Ultra-wide band short pulse radio systems / editor in chief V. Koshelev. . – Novosibirsk: science Publ. – 2015. – 483 p. (in Russian).
8. Belokon' I.N., Goncharov A.N., Ivanov E.V., Kudryachov A.S. Analysis of Technologies of High-power Pulse Radio-frequency Radiation Production and its Development Perspectives // Technologies of Electromagnetic Compatibility. – 2010. - №1(32). – P.49–57 (in Russian).
9. Kochergevsky G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. Antenna feeder device. Moscow: – Radio and connection Publ. – 1989. – 352 p (in Russian).
10. Physical encyclopedia / editor in chief Prokhorov A.M. in 5 volume. V.1. – Moscow: – Soviet encyclopedia Publ. – 1988. – P. 95 (in Russian).
11. Avdeev V.B. The direction energy characteristics of antennas and antennas systems during radiation and receiving ultra-wide band and ultra short pulses // Antennas. – 2002. – No. 7 (62). – P. 5. (in Russian).
12. Podosenov S.A., Svekis Ya.G., Sokolov A.A. The compact strip measuring converter of pulse electromagnetic field. – Moscow: Measurement Technology Publ., № 4, 1994. – P.45–47 (in Russian).
13. <http://www.all-pribors.ru>

Authors

Boyko E.N. Federal State Enterprise «12 Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation», Russian Federation, Sergiev Posad, 141307, Vesennia 2b, fgu12tsnii@mail.ru.

Ivanov E.V. Federal State Enterprise «12 Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation», Russian Federation, Sergiev Posad, 141307, Vesennia 2b, fgu12tsnii@mail.ru.

Lopotov V.S. Federal State Enterprise «12 Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation», Russian Federation, Sergiev Posad, 141307, Vesennia 2b, fgu12tsnii@mail.ru.

Popova V.N. Federal State Enterprise «12 Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation», Russian Federation, Sergiev Posad, 141307, Vesennia 2b, fgu12tsnii@mail.ru.

УДК 537.868

А.Н. Гончаров, П.Н.Калмыков, Е.Н. Бойко, И.А. Родин

Методика определения параметров наведенных сигналов при воздействии радиочастотного излучения на кабельные линии связи

В статье представлена методика определения спектрально-временных и энергетических параметров наведенных сигналов, поступающих на вход элемента радиоэлектронной аппаратуры при воздействии радиочастотного излучения на кабельные линии связи. Методика основана на численном решении интегрального уравнения Полингтона и учитывает коэффициент затухания и сопротивление нагрузки. Показано хорошее согласие расчета с результатами эксперимента при воздействии радиочастотного излучения на прямолинейные проводники.

Методика может быть использована для оценки стойкости технических средств при определении энергии, дошедшей до элемента радиоэлектронной аппаратуры при внешнем радиочастотном воздействии.

Ключевые слова: радиочастотное излучение, отказ радиоэлектронной аппаратуры, методика расчета параметров наведенных сигналов, кабельная линия связи

Актуальность, постановка задачи, допущения и ограничения

Современная инфраструктура насыщена большим количеством технических средств (ТС), в состав которых входит полупроводниковая радиоэлектронная аппаратура (РЭА), содержащая слаботочные цепи и проводящие линии связи. В аппаратуре возможны отказы при действии мощного радиочастотного (РЧ) излучения на элементы РЭА.

Возникновение отказов ТС часто обусловлено сложной электромагнитной обстановкой в местах их эксплуатации, вызванной наличием множества внешних факторов, в том числе и внешними радиочастотными воздействиями. Например, проведенные ранее исследования показали уязвимость персональных компьютеров при воздействии электромагнитного излучения [1].

При использовании ТС в полях с мощными радиочастотными помехами требуется определение уровней их отказов. Одним из основных механизмов отказов РЭА является наводка РЧ-излучения на паразитных антеннах (кабельных линиях связи и проводящих структурах) и прохождении наведенного помехового сигнала до элемента РЭА. В настоящее время известны уровни выхода из строя многих элементов РЭА. Например, энергия поражения цифровых микросхем составляет $3 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$ Дж, аналоговых – $1,5 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5}$ Дж [2, 3]. В вопросах определения стойкости ТС важным является определение энергии, дошедшей до элемента РЭА при внешнем радиочастотном воздействии.

Предполагается, что основным каналом прохождения наведенного помехового сигнала до элемента РЭА ТС является наводка РЧ-излучения на кабельные линии связи с другими блоками и устройствами из состава средства, являющимися периферийными по отношению к элементу РЭА.

Стоит отметить, что в составе ТС для фильтрации помех и выделения частотной составляющей полезных (штатных) сигналов из всего поступающего спектра могут использоваться различные пассивные помехоподавляющие устройства, например, ограничители амплитуд, фильтры и входные цепи. Данные устройства осуществляют связь проводника кабельной линии связи («паразитной» антенны) с первым активным полупроводниковым элементом РЭА, являющимся уязвимым к действию наведенного помехового сигнала при воздействии РЧ-излучения и отказ которого приведет к отказу ТС (см. рис. 1).

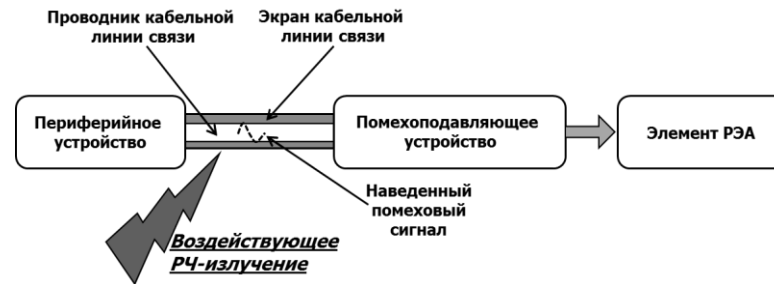


Рис. 1. Схема взаимного расположения периферийного устройства и элемента РЭА при наличии в составе ТС помехоподавляющего устройства при воздействии РЧ-излучения

Для определения параметров наведенных сигналов, поступающих на вход элемента РЭА ТС при воздействии РЧ-излучения на кабельные линии связи, используются следующие исходные данные:

- параметры воздействующего РЧ-излучения – частотный спектр электрического поля, направление вектора Пойтинга и поляризации излучения (вектора напряженности) относительно позиционирования рассматриваемой линии связи;
- параметры исследуемых кабельных линий связи – длина, радиус, удельное сопротивление, проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемости материала проводника, а также сопротивление нагрузки;
- электрические параметры помехоподавляющего устройства (ограничителя амплитуд, полосового фильтра и входной цепи) – сопротивление, емкость, индуктивность, а также эквивалентное затухание и затухание ненагруженного колебательного контура;
- параметры экранировки кабельных линий связи.

Методика определения спектрально-временных и энергетических параметров наведенного помехового сигнала, поступающего на вход элемента РЭА при воздействии РЧ-излучения на кабельные линии связи, включает в себя:

- измерение спектрально-временных и энергетических параметров воздействующего РЧ-излучения в месте размещения ТС;
- разбиение кабельной линии связи на отрезки и расчет значений тока на их поверхности для каждого отрезка в отдельности;
- решение системы линейных алгебраических уравнений (аналог интегрального уравнения), где полученные значения тока для каждого отрезка совместно с коэффициентами разложения базисных функций восстанавливают токовую функцию, аппроксимирующую истинное распределение тока;
- расчет напряжения на выходе кабельной линии связи с учетом коэффициента затухания проводнике, но без учета влияния защитных устройств;
- расчет коэффициента преобразования приемной «паразитной» антенны воздействующего РЧ-излучения в наведенный помеховый сигнал;
- расчет коэффициента передачи наведенного помехового сигнала от «паразитной» антенны до элемента РЭА ТС при наличии защитных устройств;
- расчет параметров наведенного помехового сигнала с учетом полученных коэффициентов преобразования приемной «паразитной» антенны и коэффициента передачи, а также частотного спектра, воздействующего РЧ-излучения в месте размещения ТС.

Особенностью разрабатываемой методики является возможность определения параметров наведенного помехового сигнала при воздействии на ТС как узкополосного, так и сверхширокополосного РЧ-излучения.

Кабельная линия связи рассматривается как проволочная антенна круглого сечения произвольной конфигурации и аппроксимируется в виде системы прямолинейных цилиндрических проводников на отрезках (вibratorов) длиной l_n каждый и имеющая N неограниченных узлов сшивания данных отрезков. Методика имеет ряд ограничений: длина каждого элементарного отрезка должна быть значительно больше его радиуса ($l_n \gg a_a$), длина волны воздействующего РЧ-излучения должна быть также значительно больше радиуса элементарного отрезка ($\lambda \gg a_a$), половина длины волны воздействующего РЧ-

излучения должна быть больше длины сегмента разбиения ($\lambda/2 > l_n$). Граничным условием является равенство нулю тока на концах элементарных отрезков.

Длина l_n сегмента разбиения является основным параметром численной модели, фактически определяющим ее достоверность.

Методика расчета параметров наведенных помеховых сигналов

Частотный спектр $U_s(f)$ наведенного помехового сигнала на входеполупроводникового элемента РЭА ТС может быть рассчитан по следующей формуле:

$$U_s(f) = E_s(f) \cdot K_{\text{экp}}(f) \cdot K_{\text{ант}}(f, \bar{O}) \cdot K_{\text{защ}}(f), \text{ В}, \quad (1)$$

где $E_s(f)$ – частотный спектр электрического поля, падающего непосредственно на ТС, В/м; f – частота РЧ-излучения, Гц; $K_{\text{экp}}(f)$ – коэффициент ослабления РЧ-излучения при его прохождении через экранировку кабельных линий связи, отн. ед.; $K_{\text{ант}}(f, \bar{O})$ – коэффициент преобразования приемной «паразитной» антенны в наведенный помеховый сигнал, В/(В/м); $\bar{O} = [\zeta, \theta, \vartheta]$ – вектор параметров относительного углового положения облучаемого объекта и РЧ-излучения, где ζ и θ – углы поворота объекта относительно направления на источник излучения в азимутальной и угломестной плоскостях, град., ϑ – угол поляризации излучения относительно положения объекта, град.; $K_{\text{защ}}(f)$ – коэффициент ослабления амплитуды наведенного помехового сигнала при его прохождении через помехоподавляющие устройства (ограничители амплитуд, полосовые фильтры и входные цепи), отн. ед.

Экранировка кабельных линий связи предназначена для защиты от воздействия внешних полей и располагается между проводником и внешней оболочкой. В настоящее время наибольшей популярностью пользуются следующие типы экранировок:

- пленочные экраны (из алюминиевой фольги);
- оплеточные экраны;
- экраны из спирально наложенных лент или проволок.

Материал для изготовления экрана может быть разным: фольга, специальная электропроводящая бумага, металлические ленты и др.

Коэффициент ослабления РЧ-излучения $K_{\text{экp}}(f)$ экранировкой кабельных линий связи зависит от частоты воздействующего излучения f и определяется из справочных данных, а также расчетным или экспериментальным методом.

Коэффициент преобразования приемной «паразитной» антенны определяется как отношение напряжения на выходе кабельной линии связи $U_a(f)$ к амплитуде $E_s(f)$ частотного спектра воздействующего на ТС РЧ-излучения:

$$K_{\text{ант}}(f) = U_a(f) / E_s(f), \text{ В/(В/м)}. \quad (2)$$

Для расчета амплитуды $U_a(f)$ напряжения помехового сигнала на выходе проволочной антенны произвольной конфигурации длиной L_a и радиусом a_a требуется определить ток $I(s')$ с использованием следующего интегрального уравнения Поклингтона [4]:

$$\int_0^{L_a} I(s') \cdot K(s, s') ds' = U(s), \quad (3)$$

где $K(s, s')$ – ядро интегрального уравнения Поклингтона; $U(s)$ – функция, определяющая возбуждение проволочной антенны; s' – радиус-вектор (координата) на оси проволочной антенны точки наблюдения; s – радиус-вектор (координата) на оси проволочной антенны точки интегрирования.

Для всех отрезков (вibratorов), на которые разбивается исследуемый проволочный криволинейный проводник, через значение воздействующего РЧ-излучения с учетом ориентации данных отрезков в пространстве относительно вектора напряженности воздействующего излучения выполняется расчет тока на их поверхности I_m , который для идеально проводящих объектов имеет следующий вид [5]:

$$I_m = -j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot E_m^{\text{ЭМН}}}{Z_c} \cdot \sin(|k \cdot s_m|), \text{ А}, \quad (4)$$

где $E_m^{\text{ЭМИ}}$ – касательная составляющая воздействующего РЧ-излучения на поверхности m -го отрезка (вибратора), В/м; Z_c – волновое сопротивление среды, Ом ($Z_c = 120\pi$ Ом); k – волновое число.

Интегральное уравнение Поклингтона (3) не имеет аналитического решения, поэтому для получения неизвестной функции распределения тока $I(s')$ вдоль проволочной антенны L_a используются численные методы [4]. В качестве весовых функций используются функции, комплексно-сопряженные базисным, т.е. численное решение интегрального уравнения состоит в его преобразовании к следующей системе линейных алгебраических уравнений [5;6]:

$$Z_{mn} \cdot I_n = U_m, \quad m, n = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где Z_{mn} – элементы матрицы обобщенных сопротивлений Z , Ом; U_m – элементы матрицы функции возбуждения U , В; I_n – элементы строки искоемых коэффициентов разложения тока I , А.

Уравнение (3) с функцией возбуждения (4) и с учетом влияния поверхностного сопротивления проволочной антенны Z^s имеет вид:

$$\sum_{n=2}^N I_n \cdot \left\{ \int_0^{L_a} \int_0^{L_a} [B_m(s_m, s') \cdot B_n(s_n, s') \cdot K(s_m, s_n - s')] ds' ds + \int_0^{L_a} \int_0^{L_a} \left[B_m(s_m, s') \cdot B_n(s_n, s') \cdot \left(\frac{Z^s}{2 \cdot \pi \cdot a_a \cdot Z_c} \right) \right] ds' ds \right\} = -j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot E_m^{\text{ЭМИ}}}{Z_c} \cdot \sin(|k \cdot s_m|). \quad (6)$$

Решая систему (6) относительно значений тока на поверхности каждого отрезка в отдельности и коэффициентов разложения кусочно-синусоидальных базисных функций $B_n(s_n, s')$ и $B_m(s_m, s')$, получаем распределение токов I_n вдоль проволочной антенны на заданной частоте РЧ-излучения.

Кабельная линия связи является источником излучения электромагнитной энергии во внешнее пространство, в результате чего наблюдается значительное затухание сигнала в процессе его распространения. Амплитуда напряжения на выходе кабельной линии связи в режиме холостого хода $U_a^{xx}(f)$ должна учитывать коэффициент затухания $\beta(f)$ наведенного сигнала:

$$U_a^{xx}(f) = \sum_{i=1}^n (U_n(f) \cdot e^{-\beta(f)r_n}), \quad \text{В}, \quad (7)$$

где r_n – длина отрезка кабельной линии связи, через который проходит наведенный сигнал от вибратора l_n до конца линии связи (элемента РЭА), м.

Коэффициент затухания $\beta(f)$ сигнала в линии связи зависит от частоты f воздействующего РЧ-излучения и включает коэффициенты затухания в проводнике и в изоляции (экранировке). Для большинства линий связи коэффициенты затухания в проводнике и изоляции (экранировке) являются известными значениями. В случае, когда для линий связи коэффициент затухания неизвестен, его значение может быть получено экспериментально или рассчитано.

В качестве отрезка r_n в выражении (7) используется расстояние, которое помеховый сигнал проходит от подверженного воздействию РЧ-излучения вибратора l_n до конца кабельной линии связи. Это позволяет учитывать воздействие РЧ-излучения как на всю кабельную линию связи, так и на её отрезок, на который воздействие РЧ-излучения не осуществляется (например, находится в экранированном корпусе ТС).

При расчете амплитуды напряжения $U_a^{\text{нагр}}(f)$ на выходе кабельной линии связи требуется учитывать сопротивление нагрузки $Z_{\text{нагр}}$, которое может оказывать влияние на параметры сигнала, и рассчитывается по следующей формуле [7]:

$$U_a^{\text{нагр}}(f) = \frac{U_n^{xx}(f) \cdot Z_{\text{нагр}}}{Z_a(f) + Z_{\text{нагр}}}, \quad \text{В}, \quad (8)$$

где $Z_a(f)$ – полное внутренне сопротивление антенны (проводника), Ом.

Амплитуда напряжения $U_a^{\text{нагр}}(f)$ рассчитывается для каждой частоты f из спектра РЧ-излучения, воздействующего на ТС.

При отсутствии в составе ТС на выходе кабельной линии связи перед элементом РЭА помехоподавляющих устройств (ограничителей амплитуд, полосовых фильтров и входных цепей), коэффициент ослабления амплитуды наведенного помехового сигнала $K_{\text{защ}}$ принимается равным 1.

При наличии в кабельной линии связи ТС перед элементом РЭА помехоподавляющих устройств учитывается их влияние на прохождение помехового сигнала до элемента РЭА:

При поступлении на вход ограничителя амплитуды помехового сигнала с амплитудой (мощностью), превышающей пороговый уровень, происходит срабатывание ограничителя, и он переводится в закрытое положение, тем самым не давая пройти сигналу до элемента РЭА. В этом случае выполняется расчет параметров наведенного сигнала, который успел пройти через ограничитель до момента его срабатывания. При наличии в составе ТС перед элементом РЭА фильтров и входных цепей рассчитывается коэффициент ослабления ими амплитуды наведенного помехового сигнала.

Рассмотрим пример расчета коэффициента ослабления амплитуды наведенного помехового сигнала при наличии в кабельной линии связи одноконтурной входной цепи, которая подходит к элементу РЭА.

В большинстве ТС параметры полезных сигналов фиксированы и к ним не предъявляются высокие требования к частотной избирательности. В связи с этим в составе ТС для выделения частотной составляющей полезных (штатных) сигналов из всего поступающего спектра и фильтрации помех используются одноконтурные входные цепи.

Имеются различные виды одноконтурных входных цепей, содержащих параллельный колебательный контур LC :

- с внешнеемкостной связью через конденсатор связи;
- с внутриемкостной связью с помощью конденсатора связи;
- с индуктивной (трансформаторной или магнитной) связью с помощью катушки связи, индуктивной связанной с катушкой контура;
- с комбинированной индуктивно-емкостной (индуктивной и внешнеемкостной) связью через конденсатор связи и катушку связи;
- с автотрансформаторной связью с помощью катушки связи, являющейся частью катушки контура.

Общие соотношения, в том числе при расчете коэффициента ослабления амплитуды наведенного помехового сигнала, характеризующие работу одноконтурных входных цепей при фиксированной частоте, не зависят от вида связи контура, и можно рассматривать на примере любой схемы [8].

Коэффициент ослабления амплитуды наведенного помехового сигнала входной цепи $\dot{K}_{защ}$ является безразмерной величиной и характеризует изменение амплитуды напряжения при переходе от кабельной линии связи («паразитной» антенны) доэлемента РЭА. Он имеет вид [9]:

$$\dot{K}_{защ} = \frac{m_a \cdot m_{ex}}{Z_a \cdot G_s \cdot \sqrt{1 + i \cdot \xi^2}}, \text{ отн. ед.}, \quad (9)$$

где m_a – коэффициент передачи амплитуды наведенного помехового сигнала со стороны кабельной линии связи, отн. ед.; m_{ex} – коэффициент передачи амплитуды наведенного помехового сигнала в направлении входной цепи, отн. ед.; Z_a – полное внутренне сопротивление антенны (проводника), Ом; G_s – резистивная составляющая проводимости, Ом; ξ – обобщенная расстройка, отн. ед.

Резистивная составляющая проводимости представляет собой полную активную проводимость входной цепи с учетом вносимых проводимостей из антенной цепи (кабельной линии связи) и со стороны входа следующего каскада [10]:

$$G_s = G_0 + m_a^2 \cdot G_a + m_{ex}^2 \cdot G_{ex}, \text{ См/м}, \quad (10)$$

где G_0 – собственная резонансная активная проводимость следующего каскада, См/м; G_a – проводимость «паразитной» антенны, См/м, $G_a = 1/Z_a$; G_{ex} – проводимость контура входной цепи, См/м, $G_{ex} = 1/R_{ex}$; R_{ex} – сопротивление контура входной цепи, Ом.

Собственная резонансная активная проводимость потерь следующего каскада [10]:

$$G_0 = \frac{R_{ex}}{\omega_0^2 \cdot L_{ex}^2}, \text{ См/м}, \quad (11)$$

где ω_0 – резонансная частота входной цепи $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{ex} \cdot C_{ex}}$, Гц; L_{ex} – индуктивность колебательного контура входной цепи, Гн; C_{ex} – емкость колебательного контура входной цепи, Ф.

Обобщенная расстройка зависит от отношений резонансной частоты входной цепи и угловой частоты воздействующего РЧ-излучения [9, 10]:

$$\xi = \frac{1}{\delta_{\text{эк}}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{РЧИ}}}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_{\text{РЧИ}}} \right), \text{ отн. ед.} \quad (12)$$

где $\delta_{\text{эк}}$ – эквивалентное затухание в контуре входной цепи, отн. ед; $\omega_{\text{РЧИ}}$ – угловая частота воздействующего РЧ-излучения, Гц.

Сравнительная оценка результатов расчета и экспериментов

Проведено сравнение спектров наведенных помеховых сигналов на выходе прямолинейных проводников при воздействии РЧ-излучения, полученных при расчете и экспериментально. Экспериментальные исследования проводились на экспериментально-испытательной базе 12 ЦНИИ МО РФ натурным методом – путем непосредственного облучения РЧ-излучением проводников и регистрацией параметров сигналов на их выходе.

Объектами исследований являлись три прямолинейных медных проводника: проводник № 1 (длина 0,7 м, радиус 0,4 мм), проводник № 2 (длина 0,85 м, радиус 0,16 мм) и проводник № 3 (длина 1 м, радиус 0,7 мм).

С целью исключения влияния отражающих поверхностей, а также требуемого позиционирования исследуемого проводника в пространстве относительно вектора напряженности электрического поля E , формируемого излучающим стендом, проводник размещался на уровне центра антенны стенда, а измерительный канал, связывающий проводник с аппаратурой измерения, экранировался.

В ходе проведения экспериментов использовался стенд сверхкороткоимпульсного сверхширокополосного РЧ-излучения «Залив» из состава экспериментально-испытательной базы 12 ЦНИИ МО РФ, который при помощи специального обострителя способен изменять свои спектрально-временные параметры.

На рис. 2 представлены формы и спектры импульсов, формируемых стендом «Залив» с обострителем и без обострителя, в месте размещения исследуемых проводников. Схема проведения экспериментов с проводниками представлена на рис. 3.

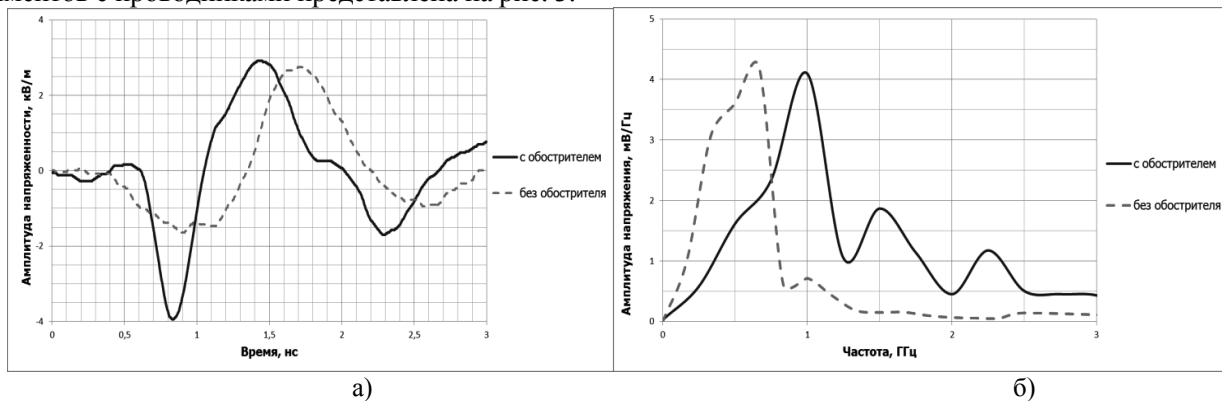


Рис. 2. Формы (а) и спектры (б) импульсов, формируемых стендом «Залив», в месте размещения исследуемых проводников

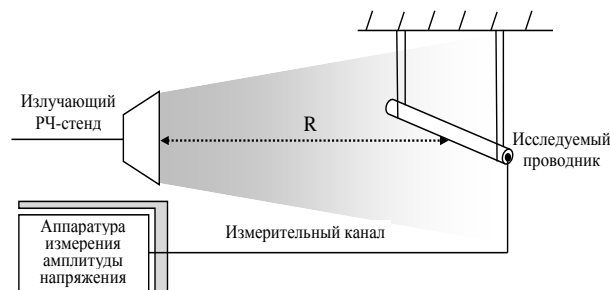


Рис. 3. Схема проведения экспериментов
(R – расстояние между исследуемым проводником и антенной стенда)

При расчете спектров сигналов на выходе исследуемых проводников выполнялось произведение частотного спектра импульса в месте размещения проводников на коэффициенты преобразования

$K_{ам}(f, \bar{O})$. Расчет коэффициентов преобразования $K_{ам}(f, \bar{O})$ выполнялся в диапазоне частот спектров воздействующего РЧ-излучения 50 МГц...3 ГГц с частотой шага 50 МГц. Исследуемые проводники разделялись:

- проводник №1 – на 20 отрезков длиной 3,5 см каждый;
- проводник №2 – на 25 отрезков длиной 3,4 см каждый;
- проводник №3 – на 25 отрезков длиной 4 см каждый.

При проведении измерений амплитуды напряженности воздействующего сверхкороткоимпульсного РЧ-излучения погрешность не превышала ± 3 дБ. Частотные спектры сигналов на выходе исследуемых проводников, регистрируемые цифровым осциллографом Rohde&Schwarz RTO 1044, и результаты расчета спектров представлены на рис. 4–6.

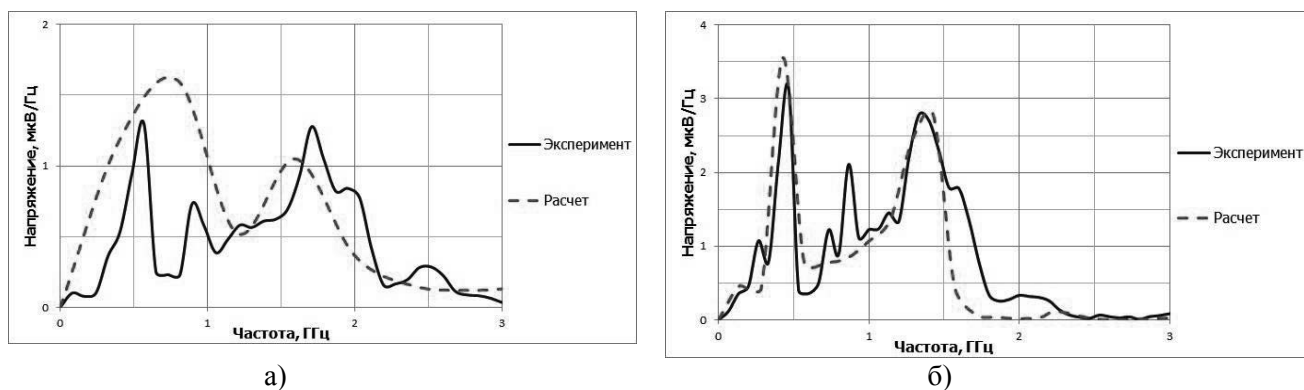


Рис.4. Проводник №1 (длина 0,7 м, радиус 0,4 мм):
 а) частотный спектр сигнала при воздействии излучением стенда с обострителем;
 б) частотный спектр сигнала при воздействии излучением стенда без обострителя

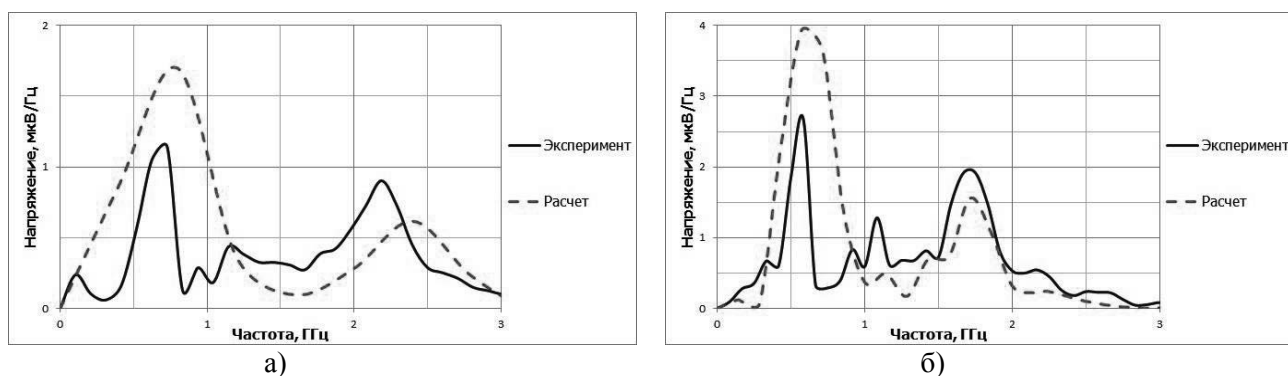


Рис. 5. Проводник №2 (длина 0,85 м, радиус 0,16 мм):
 а) частотный спектр сигнала при воздействии излучением стенда с обострителем;
 б) частотный спектр сигнала при воздействии излучением стенда без обострителя

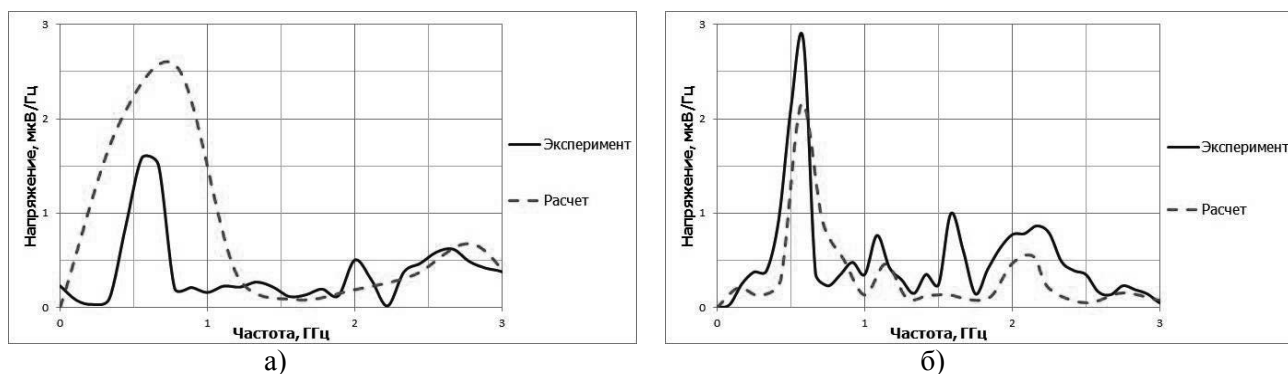


Рис. 6. Проводник №3 (длина 1 м, радиус 0,7 мм):
 а) частотный спектр сигнала при воздействии излучением стенда с обострителем;
 б) частотный спектр сигнала при воздействии излучением стенда без обострителя

Представленные на рисунках спектры сигналов показывают удовлетворительное согласие расчета с результатами эксперимента при воздействии РЧ-излучения на прямолинейные проводники с учетом погрешности измерений.

Заключение

Представленная методика предназначена для расчета спектрально-временных и энергетических параметров наведенного помехового сигнала, поступающего на вход элемента РЭА при воздействии РЧ-излучения на кабельные линии связи.

Особенностями методики являются:

- возможность проведения исследований практически во всем радиочастотном диапазоне;
- учет коэффициента затухания кабельной линии связи при распространении наведенного помехового сигнала до элемента РЭА и сопротивления нагрузки;
- учет наличия в составе РЭА ТС помехоподавляющих устройств (например, ограничителей амплитуд, фильтров и входных цепей);
- возможность расчета параметров наведенного сигнала при воздействии как узкополосного, так и сверхширокополосного РЧ-излучения.

Показано хорошее согласие расчета параметров наведенного сигнала с результатами эксперимента при воздействии РЧ-излучения на прямолинейные проводники.

Список литературы

1. Исследования функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, О.В. Михеев. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – № 2 (17). – С. 44–49.
2. Добыкин, В.Д. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин [и др.] – М.: Вузовская книга. – 2007.
3. Электромагнитные системы и средства преднамеренного воздействия на физические и биологические объекты / Р.П. Быстров, В.Г. Дмитриев [и др.] // Радиоэлектроника. – 2014. № 2, том 6. – С. 129-169.
4. Егоров, Ю.Н. Методика численного решения задачи токораспределения для проволочных антенн методом интегральных уравнений / Ю.Н. Егоров, В.В. Гладейчук // Доклады БГУИР Военной академии Республики Беларусь. – 2017. – № 4(106). – С. 56–61.
5. Аронов, Л.В. Метод расчета распределения токов цилиндрического проводника большого радиуса / Л.В. Аронов // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 55. – С. 28–32.
6. Митра, Р. Вычислительные методы в электродинамике. – М.: Издательство «Мир», 1977. – С. 485.
7. Надененко, С.И. Антенны / С.И. Надененко – М.: Связьиздат, 1959. – 555 с.
8. Парфенов, В.И. Входные цепи. Учебно-методическое пособие для вузов / В.И. Парфенов, А.В. Захаров. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 36 с.
9. Буга, Н.Н. Радиоприемные устройства: учебник для вузов / Н.Н. Буга, А.И. Фалько, Н.И. Чистяков – М.: Радио и связь, 1986. – 320 с.
10. Арсланов, М.З. Радиоприемные устройства: учебное пособие для вузов / М.З. Арсланов, В.Ф. Рябков – М.: Советское радио, 1972. – 392 с.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России) Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Авторы

Гончаров Алексей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Калмыков Петр Николаевич, научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Бойко Евгений Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Родин Игорь Анатольевич, старший научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Goncharov A.N., Kalmykov P.N., Boyko E.N., Rodin I.A.

Method for the parameters of induced signals when exposed to radiofrequency radiation on cable communication lines

Abstract. The article presents a methodology for determining the spectral-temporal and energy parameters of induced signals received at the input of an element of electronic equipment. The technique is based on a numerical solution of Pocklington's equation and takes into account the attenuation coefficient and load resistance. Good agreement is shown between the calculation and experimental results when radiofrequency radiation acts on rectilinear conductors.

The technique can be used to assess the stability of technical means in determining the energy that has reached a element of electronic equipment under external radiofrequency exposure.

Key words: radiofrequency radiation, radioelectronic equipment failure, method of calculating induced signals parameters, cable communication lines

References

1. Research on the functioning of personal computers under the influence of ultrashort electromagnetic pulses / K.Yu. Sakharov, O.V. Mikheev // Technologies of electromagnetic compatibility – 2006. No 2 (17) – p. 44–49. (in Russian)
2. Dobykin V.D., Electronic warfare. Force damage to electronic systems / V.D. Dobykin [et al.] – M.: University Book. – 2007. (in Russian)
3. Electromagnetic system and means of deliberate impact on physical and biological objects / R.P. Bystrov, V.G. Dmitriev [et al.] // Radioelectronics – 2014. No 2, volume 6. – p. 129–169. (in Russian)
4. Egorov Yu.N., Technique of numerical solution of the current distribution problem for wire antennas by the method of integral equations / Yu.N. Egorov, V.V. Gladeychuk // Reports of BSUIR Military Academy of the Republic of Belarus. – 2017. No. 4(106). – P.56–61. м
5. Aronov L.V., Method for calculating the distribution of currents of a cylindrical conductor of large radius / L.V. Aronov // Bulletin of the Russian State Technical University. – 2016. – No. 55. – P. 28–32. м
6. Mitra R., Computational methods in electrodynamics. – M.: Publishing house «Mir», 1977, – P. 485. (in Russian)
7. Nadenenko S.I., Antennas / S.I. Nadenenko – M.: Svyazizdat, 1959. – 555 p. (in Russian)
8. Parfenov V.I., Input circuits. Teaching aid for universities / V.I. Parfenov, A.V. Zakharov– Voronezh: Publishing and Printing Center of Voronezh State University, 2008. – 36 p. (in Russian)
9. Buga N.N., Radio receivers: a textbook for high schools / N.N. Buga, A.I. Falco, N.I. Chistyakov – M.: Radio and communications, 1986. – 320 p. (in Russian)
10. Arslanov M.Z., Radio receivers: textbook for universities / M.Z. Arslanov, V.F. Ryabkov – M.: Soviet Radio, 1972 – 392 p. (in Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Authors

Goncharov Aleksey N., candidate of engineering science, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Kalmykov Petr N., scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Boyko Evgeny N., candidate of engineering science, senior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Rodin Igor A., senior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

УДК 537.868

А.Н. Гончаров, П.Н. Калмыков, А.А. Пирожков, М.С. Степанов

Оценка напряжения наведенного сигнала при воздействии радиочастотного излучения на радиоэлектронную аппаратуру технических средств

В статье выполнены оценки влияния длины кабельной линии связи, позиционирования и ракурса облучения на коэффициент преобразования воздействующего радиочастотного излучения в наведенный помеховый сигнал, поступающий на вход элемента радиоэлектронной аппаратуры технических средств. Показано влияние сопротивления нагрузки и затухания при прохождении наведенного сигнала до элемента радиоэлектронной аппаратуры. На амплитуду напряжения наведенного помехового сигнала в значительной степени влияет полное сопротивление кабельной линии связи, зависящее от длины проводника и частоты воздействующего излучения – с увеличением полного сопротивления проводника амплитуда напряжения наведенного помехового сигнала на входе элемента уменьшается.

Ключевые слова: радиочастотное излучение, отказ радиоэлектронной аппаратуры, кабельная линия связи, амплитуда напряжения наведенного сигнала

При оценке стойкости технических средств (ТС) к воздействию радиочастотного (РЧ) излучения важным является определение влияния длины кабельных линий связи, их позиционирования и ракурса облучения на амплитуду напряжения наведенного помехового сигнала, поступающего на вход элемента радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Для решения этой задачи используется методика определения спектрально-временных и энергетических параметров наведенного помехового сигнала, основанная на численном решении интегрального уравнения Поклингтона [1–5], позволяющая проводить исследования с проводниками произвольной конфигурации практически во всем радиочастотном диапазоне. Методика учитывает сопротивление нагрузки и затухание наведенного помехового сигнала при его распространении до элемента РЭА и включает в себя:

- экспериментальное определение спектрально-временных и энергетических параметров воздействующего РЧ-излучения;
- решение системы линейных алгебраических уравнений для определения распределения тока в проводнике;
- расчет коэффициента преобразования приемной «паразитной» антенны и коэффициента передачи наведенного помехового сигнала до элемента РЭА ТС в диапазоне частот воздействующего РЧ-излучения с учетом помехоподавляющих устройств (при их наличии);
- расчет параметров наведенного помехового сигнала с учетом полученных коэффициентов преобразования приемной «паразитной» антенны и коэффициента передачи, а также частотного спектра воздействующего РЧ-излучения в месте размещения ТС.

Оценим влияние длины проводника кабельной линии связи на коэффициент преобразования воздействующего РЧ-излучения в наведенный помеховый сигнал, поступающий на вход элемента РЭА ТС. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента преобразования от длины проводника (вектор напряженности электрического поля РЧ-излучения параллелен позиционированию проводника, радиус проводников 0,1 мм).

Анализ представленных на рис. 1 зависимостей показал следующие закономерности.

Коэффициент преобразования имеет синусоидальный вид в зависимости от длины проводника. Минимум $K_{ант}^{min}$ соответствует длине проводника L_a равной длине волны λ воздействующего РЧ-излучения, а максимум $K_{ант}^{max}$ длине проводника равной половине длины волны λ :

$$K_{ант}^{min} \mapsto L_a = \lambda \cdot n,$$

$$K_{\text{ант}}^{\text{max}} \mapsto L_a = \frac{\lambda}{2} + \lambda \cdot n,$$

где n – целое число.

Данное наличие резонансных частот для прямолинейных отрезков проводников характерно для полуволновых вибраторов [6, 7].

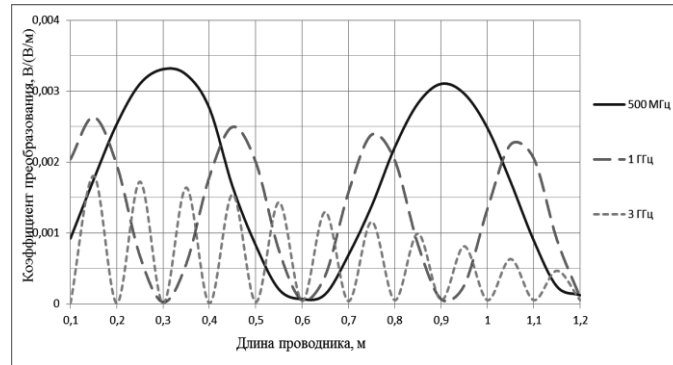


Рис. 1. Зависимость коэффициента преобразования прямолинейного проводника от длины на различных частотах воздействующего РЧ-излучения

Коэффициент преобразования зависит от полного внутреннего сопротивления $Z_a(f)$ «паразитной» антенны, которое имеет как активную $R_a(f)$, так и реактивную $X_a(f)$ составляющие [8]:

$$Z_a(f) = R_a(f) + i \cdot X_a(f), \text{ Ом.} \quad (1)$$

С увеличением длины облучаемого проводника L_a при фиксированной частоте воздействующего РЧ-излучения коэффициент преобразования уменьшается, что обусловлено увеличением активного сопротивления проводника на заданной частоте. Также с увеличением частоты воздействующего РЧ-излучения при фиксированной длине проводника значения максимумов коэффициентов преобразования на резонансных частотах уменьшаются, что обусловлено увеличением реактивного сопротивления проводника.

Поскольку расположение кабельных линий связи в ТС может быть произвольным, выполним оценки влияния конфигурации линий связи и ракурса облучения на коэффициент преобразования воздействующего РЧ-излучения в наведенный помеховый сигнал. Для конфигурации проводников, представленных на рис. 2, проведены расчеты коэффициента преобразования в зависимости от частоты воздействующего РЧ-излучения (см. рис. 3) и ракурса облучения (см. рис. 4).

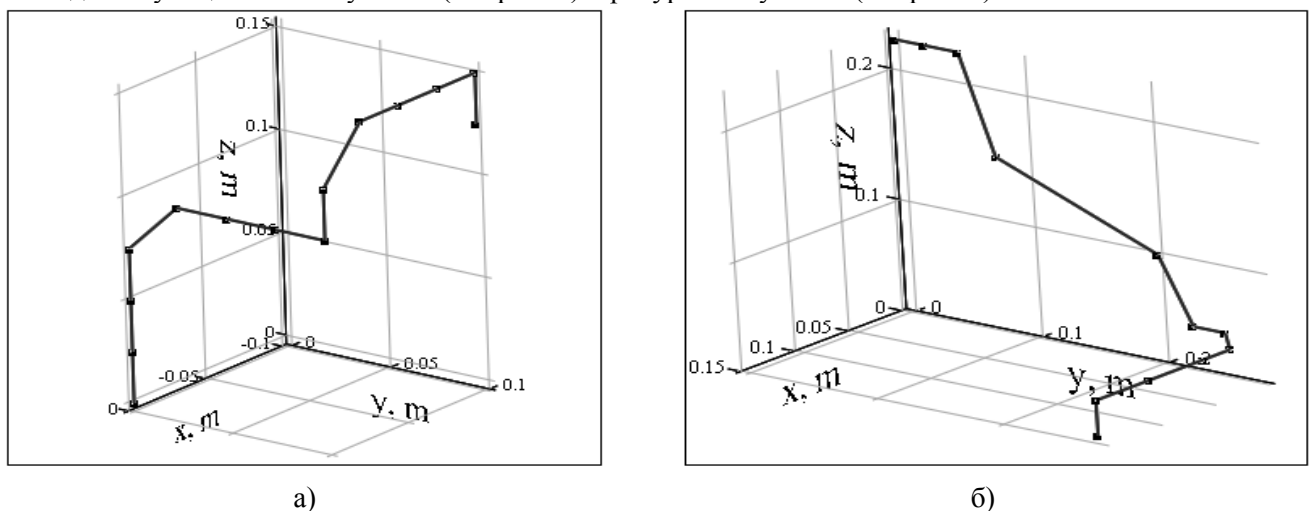


Рис. 2. Конфигурация проводников: а) тип 1 (длина – 0,35 м); б) тип 2 (длина – 0,6 м)

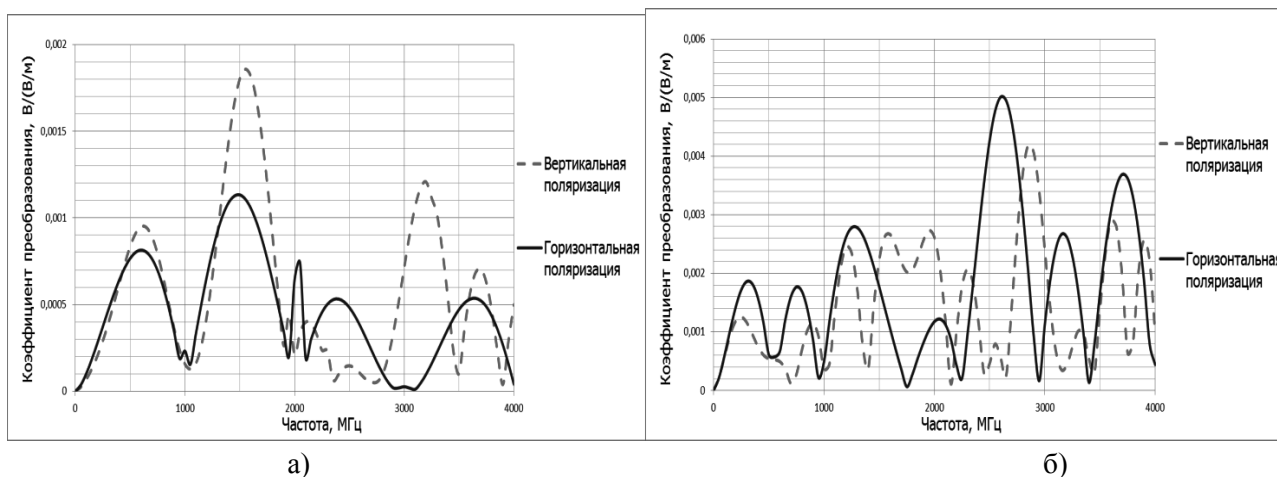


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от частоты действующего РЧ-излучения на проводники двух типов конфигурации: а) тип 1; б) тип 2

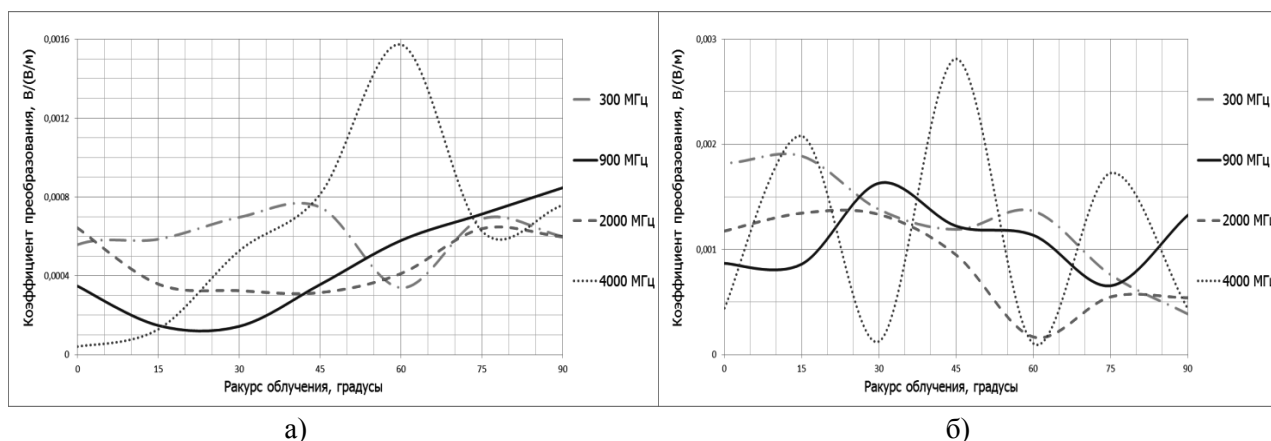


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования от ракурса облучения при воздействии РЧ-излучения с горизонтальной поляризацией на проводники двух типов конфигурации: а) тип 1; б) тип 2

Анализ результатов расчетов с произвольным расположением проводников показал наличие резонансных частот, на которых наблюдаются минимумы и максимумы коэффициентов преобразования, зависящих от длин отрезков проводников и их положения в пространстве относительно вектора напряженности. Например, на рис. 3а наблюдается следующие резонансные значения коэффициента преобразования:

- максимальное значение коэффициента преобразования достигается для частот 1500 МГц (вертикальная и горизонтальная поляризации) и 3200 МГц (вертикальная поляризация), что связано с наличием отрезков проводников длиной 10 и 4,5 сантиметров и соответствующей ориентации;
- минимальное значение коэффициента преобразования соответствует частоте 3000 МГц (вертикальная и горизонтальная поляризация), что связано с отсутствием в рассматриваемых конфигурациях проводников отрезков оптимальной длины для этой частоты РЧ-излучения.

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента преобразования от ракурса облучения для проводников с конфигурациями, представленными на рис. 2. В зависимости от частоты действующего РЧ-излучения и ракурса облучения отношение между минимальными и максимальными значениями коэффициентов преобразования составляет ~ 25 раз.

Таким образом, коэффициент преобразования действующего РЧ-излучения в наведенный помеховый сигнал сильно зависит от частоты излучения и взаимного расположения отрезков проводников с вектором напряженности электрического поля.

Рассмотрим пример, когда воздействие РЧ-излучения осуществляется на отрезок кабельной линии связи. Оценим влияние коэффициента затухания амплитуды напряжения наведенного помехо-

вого сигнала при его прохождении до элемента РЭА ТС. Амплитуда напряжения $U_a(f)$ на выходе кабельной линии связи с учетом коэффициента затухания $\beta(f)$ наведенного сигнала рассчитывается по формуле:

$$U_a(f) = \sum_{i=1}^n (U_n(f) \cdot e^{-\beta(f)r_n}), \text{ В}, \quad (2)$$

где $U_n(f)$ – амплитуда напряжения на выходе кабельной линии связи без учета затухания на частоте излучения f , В; r_n – длина кабельной линии связи, через который проходит наведенный сигнал от отрезка l_n до конца линии связи (элемента РЭА), м.

На рис. 5 для кабеля RFA 1/2-50 (диаметр проводника – 4,8 мм, материал диэлектрика – физически вспененный полиэтилен, экранировка – медная гофрированная трубка, внешний диаметр экранировки – 13,9 мм, внешний диаметр кабеля – 16 мм) [9] показано влияние затухания при распространении наведенного помехового сигнала в зависимости от частоты РЧ-излучения и длины проводника.

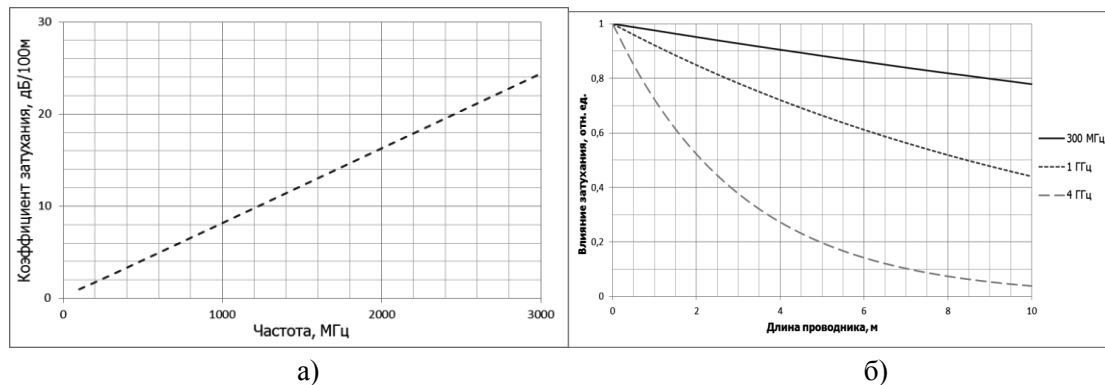


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания от частоты РЧ-излучения (а) и влияние затухания на распространение сигнала по проводнику (б)

Рост коэффициента затухания обусловлен увеличением полного сопротивления проводника, что связано с преобразованием части электрической энергии сигнала в тепловую энергию. С увеличением длины проводника наблюдается увеличение активного сопротивления проводника, а с увеличением частоты РЧ-излучения – реактивного сопротивления. Таким образом, с увеличением частоты воздействующего РЧ-излучения и по мере прохождения сигнала по проводнику, амплитуда напряжения наведенного помехового сигнала, поступающего на вход элемента РЭА ТС, уменьшается.

В расчетах амплитуды напряжения наведенного помехового сигнала, поступающего на вход элемента РЭА ТС, требуется учитывать сопротивление нагрузки $Z_{нагр}$ [10]:

$$U_a^{нагр}(f) = \frac{U_a^{xx}(f) \cdot Z_{нагр}}{Z_a(f) + Z_{нагр}}, \text{ В}, \quad (3)$$

где $U_a^{нагр}(f)$ – амплитуда напряжения сигнала на выходе проводника кабельной линии с учетом нагрузки, В; $U_a^{xx}(f)$ – амплитуда напряжения сигнала на выходе проводника кабельной линии в режиме холостого хода, В; $Z_a(f)$ – полное внутренне сопротивление проводника кабельной линии, Ом.

Без учета сопротивления нагрузки (в режиме холостого хода) амплитуда напряжения наведенного сигнала поступающего на вход элемента РЭА ТС принимает максимальное значение. На рис. 6 показаны оценки влияния сопротивления нагрузки 50 Ом для проводников различной длины (радиус проводника 0,35 мм) в зависимости от частоты РЧ-излучения.

Анализ представленных на рис. 6 результатов показал, что при фиксированном значении сопротивления нагрузки с увеличением частоты РЧ-излучения и длины проводника увеличивается влияние сопротивления нагрузки на амплитуду напряжения наведенного помехового сигнала. Это обусловлено тем, что с увеличением частоты РЧ-излучения и длины проводника возрастает реактивное и активное сопротивление проводника. Таким образом, при увеличении полного сопротивления проводника увеличивается влияние сопротивления нагрузки, и амплитуда напряжения наведенного помехового сигнала на входе элемента РЭА ТС уменьшается.

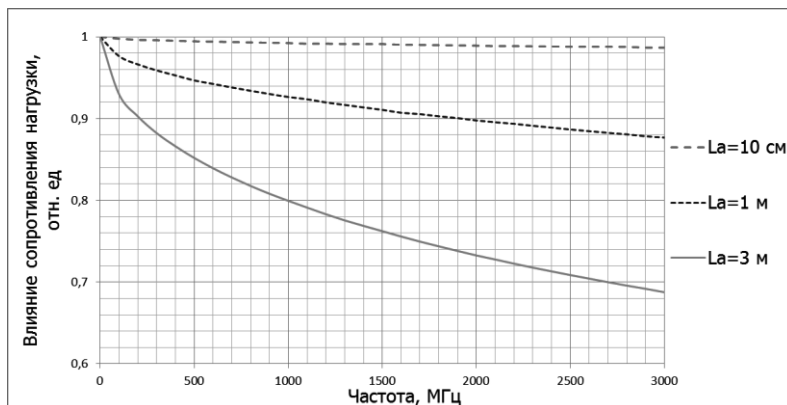


Рис. 6. Оценки влияния сопротивления нагрузки на амплитуду напряжения наведенного помехового сигнала в зависимости от длины проводника L_a и частоты РЧ-излучения

Заключение

Выполнена количественная оценка влияния длины проводника кабельной линии связи, его конфигурации и частоты воздействующего РЧ-излучения на коэффициент преобразования воздействующего излучения в наведенный помеховый сигнал, а также оценки влияния сопротивления нагрузки и затухания на распространение сигнала по проводнику.

Полученные результаты показали, что для ТС наибольшую опасность представляет наведенный сигнал РЧ-излучения в непосредственной близости от элемента РЭА, поскольку снижается влияние затухания на его распространение.

В значительной степени на амплитуду напряжения наведенного помехового сигнала РЧ-излучения влияет полное сопротивление проводника кабельной линии связи, которое зависит от длины проводника и частоты воздействующего РЧ-излучения, поскольку с их возрастанием наблюдается увеличение реактивного и активного сопротивления проводника. С увеличением полного сопротивления проводника амплитуда напряжения наведенного помехового сигнала, поступающего на вход элемента РЭА ТС, уменьшается.

Для проводников произвольной конфигурации характерно наличие резонансных частот, зависящих от взаимного расположения отрезков проводника и вектора напряженности электрического поля воздействующего РЧ-излучения.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке уровней устойчивости РЭА ТС и при проектировании (конструировании) его основных (критических) элементов (узлов).

Список литературы

1. Акбашев, Б.Б. Информационная безопасность специальных технических зданий при электромагнитных воздействиях: дис. док.тех. наук: 05.13.19 / Акбашев Беслан Борисович – М., 2009. – 401 с.
2. Михайлов, В.А. Разработка методов и моделей анализа и оценки устойчивого функционирования бортовых цифровых вычислительных комплексов в условиях преднамеренного воздействия сверхкоротких электромагнитных излучений: дис. док.тех. наук: 05.12.13 / Михайлов Виктор Алексеевич – М., 2014. – 390 с.
3. V. Barrera-Figueroa, J. Sosa-Pedroza, J. López-Bonilla, Simplification of Pocklington's integral equation for arbitrary bent thin wires, WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol 39, pp. 563–574, 2005.
4. Shekhar, T. Khan, A. Singhal, S. Pr. Singh, Study and Analysis of Wire Antenna using Integral Equations: A MATLAB Approach., International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 12 No. 4 Sep. 2015, pp. 931–942, 2015.
5. Анализ ограничений применимости телеграфных уравнений для расчета наводок на проводных линиях от коротких электромагнитных импульсов / Ю.В. Парфенов, О.А. Тарасов и др. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – № 3(70). – С. 5–15.

6. Кочержевский, Г.Н. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
7. Марков, Г.Т. Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е. / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
8. Драбкин, А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов – М.: Сов.радио, 1974 – 536 с.
9. ДракаRFA 1/2-50 Коаксиальный кабель 1/2” [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://alpha-com.ru>, 2019.
10. Надененко, С.И. Антенны / С.И. Надененко – М.: Связьиздат, 1959. – 555 с.

Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России) Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Авторы

Гончаров Алексей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Калмыков Петр Николаевич, научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Пирожков Андрей Алексеевич, начальник лаборатории, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Степанов Михаил Сергеевич, младший научный сотрудник, Федеральное государственное казённое учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России); Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев Посад, 141307, улица Весенняя, дом 2б.

Goncharov A.N., Kalmykov P.N., Pirozhkov A.A., Stepanov M.S.

Assessing the voltage of the induced signal under the influence of radiofrequency radiation on the electric equipment hardware

Abstract. The article evaluates the effect of the length of the cable communication line, positioning and the angle of exposure on the conversion coefficient of the acting radiofrequency radiation into the induced interference signal received on input of a element of electronic equipment hardware. The effect of load resistance and attenuation during the passage of the induced signal to an element of electronic equipment is shown. The amplitude of the voltage of the induced interfering signal is largely affected by the total resistance of the cable line, depending on the length of the conductor and the frequency of the acting radiation – with an increase of the conductor’s total resistance, the voltage amplitude of the induced interfering signal at the input of the element decreases.

Key words: radiofrequency radiation, radioelectronic equipment failure, cable communication lines, voltage amplitude of the induced signal

References

1. Akbashev, B.B. Information security of special technical buildings with electromagnetic influences: dis. dr. tech. sc.: 05.13.19 / Akbashev Beslan Borisovich – M., 2009. – 401 p. (in Russian)
2. Mikhailov, V.A. Development of methods and models for analysis and evaluation of the stable functioning of on-board digital computers systems under the conditions of deliberate exposure to ultrashort electro-

- magnetic radiation: dis. dr. tech. sc.: 05.12.13 / Mikhailov Victor Alekseevich – M., 2014. – 390 p. (in Russian)
3. V. Barrera-Figueroa, J. Sosa-Pedroza, J. López-Bonilla, Simplification of Pocklington's integral equation for arbitrary bent thin wires, WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol 39, pp. 563–574, 2005.
 4. Shekhar, T. Khan, A. Singhal, S. Pr. Singh. Study and Analysis of Wire Antenna using Integral Equations: A MATLAB Approach., International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028–9324 Vol. 12 No. 4 Sep. 2015, pp. 931–942, 2015.
 5. Analysis of the limitations of the applicability of telegraph equations for the calculation of leads on wire lines from short electromagnetic pulses / Yu.V. Parfenov, O.A. Tarasov [et al.] // Technologies of electromagnetic compatibility – 2019. No 3 (70) – p. 5–15. (in Russian)
 6. Kocherzhevsky, G.N Antenna-feeder devices / G.N. Kocherzhevsky, G.A. Erokhin, N.D. Kozyrev – M.: Radio and communications, 1989. – 352 p. (in Russian)
 7. Markov, G.T. Antennas. A textbook for students of radio engineering specialities of universities. Ed. 2nd / G.T. Markov, D.M. Sazonov – M.: Energy, 1975 – 528 p. (in Russian)
 8. Drabkin, A.L. Antenna-feeder devices / A.L. DRabkin, V.L. Zuzenko, A.G. Kislov – M.: Soviet radi, 1974 – 536 p. (in Russian)
 9. Draka RFA 1/2-50 Coaxial cable 1/2" [Electronic resource] – Access mode: <http://alpha-com.ru>, 2019.
 10. Nadenenko S.I., Antennas / S.I. Nadenenko – M.: Svyazizdat, 1959. – 555 p. (in Russian)

Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of Russian Federation (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Authors

Goncharov Aleksey N., candidate of engineering science, leading scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Kalmykov Petr N., scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Pirozhkov Andrey A., head of laboratory, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

Stepanov Mikhail S., junior scientific associate, Federal state government institution «12 Central Research Institute» of Ministry of Defence of RF (12 CNII), ul. Vesennyaya, 2b, SergievPosad, Moscow region, Russia, 141307.

ДЛЯ ЗАМЕТОК