

УДК 519.2

С.П. ШАЛАМОВ**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ**

Наведено конструкції полеутворюючих систем придатних до генерування імпульсного електромагнітного поля, що задовольняє вимогам процедури NRS03 стандарту НАТО STANAG АЕСТР- 500. Розглянуті вимоги до форми імпульсу електромагнітного поля і до геометричних параметрів робочої зони полеутворюючої системи залежно від габаритів випробовуваного виробу. Представлені результати розрахунку процесу поширення електричного поля в робочій зоні полеутворюючої системи, з урахуванням впливу можливої нерівності заземленої поверхні.

Ключові слова: STANAG АЕСТР-500, ТЕМ камера, GTEM камера, відкритий випробувальний майданчик, імпульсне електромагнітне поле.

Приведены конструкции полеобразующих систем пригодных для генерирования импульсного электромагнитного поля в соответствии требованиям процедуры NRS03 стандарта НАТО STANAG АЕСТР-500. Рассмотрены требования к форме импульса электромагнитного поля и к геометрическим параметрам рабочей зоны полеобразующей системы в зависимости от габаритов испытываемого изделия. Представлены результаты расчета процесса распространения электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы, с учетом влияния возможной неровности заземленной поверхности.

Ключевые слова: стандарт STANAG АЕСТР-500, ТЕМ камера, GTEM камера, открытая испытательная площадка, импульсное электромагнитное поле.

The electromagnetic compatibility is becoming more challenging with the development of new electronic products and technologies. Test procedures related to electromagnetic compatibility continue to be introduced and updated on a regular basis. This article is dedicated to electromagnetic compatibility according to STANAG АЕСТР-500 "Electromagnetic Environmental Effects. Test and Verification". This application note is trying to give an overview of test device such as a TEM cell, GTEM cell, open area test site and show their respective advantages and disadvantages. Test sites examples are presented. Configure the test equipment is presented. Tolerances and characteristics of the pulsed field limit are described. This article considers a pulse propagating down a transmission line and describes a study of the effects that curvature has on electromagnetic wave.

Keywords: STANAG АЕСТР-500, TEM cell, GTEM cell, open area test site, pulsed electromagnetic field.

Введение. В связи с широким распространением микроэлектроники и микропроцессорной техники в различных областях техники, проблема устойчивости технических средств к действию деструктивных электромагнитных полей становится все более актуальной. Деструктивные явления могут проявляться в виде обратимых и необратимых нарушений и повлечь за собой серьезные последствия. Источники помех могут носить естественный и искусственный характер. Наиболее опасными из естественных источников помех является разряды молнии. Наиболее мощным источником искусственных электромагнитных помех является электромагнитный импульс, возникающий при ядерных взрывах (ЭМИ ЯВ).

Цель статьи. Целью данной статьи является определение допустимых характеристик полеобразующей системы, удовлетворяющей требованиям процедуры NRS03 стандарта НАТО STANAG АЕСТР-500:2016 [1] и оценка путей реализации.

Актуальность темы и анализ последних достижений. ЭМИ ЯВ является одним из самых мощных источников помех, поэтому, в научной литературе уделяется много внимания способам защиты оборудования от деструктивного воздействия ЭМИ ЯВ. Деструктивное воздействие удаленного ядерного взрыва на электронную аппаратуру было обнаружено при первых испытаниях. В 1962 году (22 октября, 28 октября и 1 ноября) в Советском Союзе была произведена се-

рия из трех высотных ядерных взрывов, каждый мощностью в 300 кт (К3-184; К4-187 и К5-195), направленных на изучение явления ЭМИ ЯВ. Во время одного из тестов (К3-184) были зафиксированы импульсные токи до 3400 А в проводах воздушных телефонных линий, которые обусловили появление импульсного напряжения с амплитудой до 28 кВ, срабатывание всех установленных в аппаратуре разрядников и перегорание всех предохранителей, что сопровождалось прекращением работы системы связи, зафиксировано повреждение систем радиосвязи на расстоянии 600 км от эпицентра взрыва, выход из строя радиолокатора, расположенного на расстоянии 1000 км, повреждения трансформаторов и генераторов на электростанциях, пробой изоляторов ЛЭП. Поскольку аппаратура поколения 60-х годов выполнялась на электромеханических элементах и радиолампах, она была более устойчива к воздействию преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий, чем современная микроэлектронная и микропроцессорная техника [2].

В технической литературе преднамеренные электромагнитные деструктивные воздействия (ПЭДВ) называются «High Power Electromagnetic Threats (НРЕМ)» и подразделяются на два вида: высотный электромагнитный импульс ядерного взрыва – «High-Altitude Electromagnetic Pulse (НЕМР)» и преднамеренно излучаемые электромагнитные помехи (ПИЭМ) – «Intentional Electromagnetic Interference (ИЕМИ)». Существует значительное число стандартов, разработанных

ных по этой тематике такими организациями, как Международная Электротехническая Комиссия (МЭК), специальная комиссия при Конгрессе США, Европейские нормы, общество IEEE. Среди стандартов, разработанных Министерством обороны США и НАТО занимают особое место MIL-STD-461G [3] и NATO AECTP-500:2016 [1]. Эти стандарты предъявляют требования к испытательному оборудованию и методике проведения испытаний на все возможные виды электромагнитных воздействий.

Разработкой оборудования для тестирования на устойчивость объектов к воздействию импульсного электромагнитного излучения занимается более 35 организаций в разных странах, в том числе: Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Новосибирск, Россия), Всероссийский научно-исследовательский центр ВЭИ (ВНИЦ ВЭИ г. Москва, Россия), Техасский технический университет (г. Лаббок, США), Исследовательский центр ядерной физики SOREQ (г. Явне, Израиль), Северо-западный Институт ядерных технологий (г. Сиань, Китай). Среди такого рода оборудования присутствуют и установки для генерации ЭМИ ЯВ, представленные на рис. 1, 2.



Рисунок 1 – Стационарный имитатор ЭМИ ЯВ «Аллюр» ФГУП ВЭИ (г. Истра, Московской обл.). Габариты имитатора: 100 x 35 x 13,5 м; рабочий объем: 10×10×10 м; форма импульса: 2,5/25 нс; максимальная напряженность импульса электрического поля: 70 кВ/м

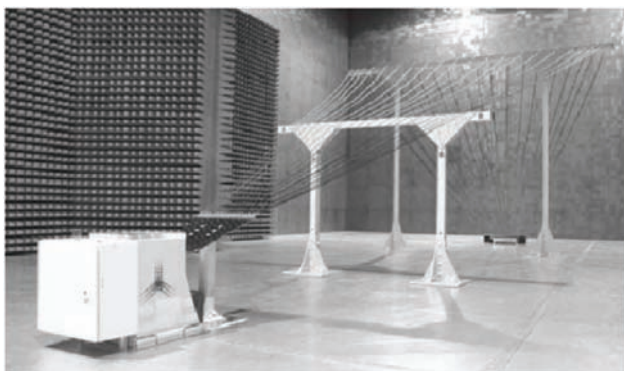


Рисунок 2 – Испытательный стенд, производимый компанией Montena Technology (США) для лабораторных испытаний крупных объектов

Форма импульса электрического поля, в соответствии с требованиями стандарта NATO AECTP-500:2016 [1], приведена на рис. 3, и описывается следующим выражением:

$$\begin{cases} E(t) = 0, t \leq 0; \\ E(t) = E_0 \times k(e^{-at} - e^{-bt}), t \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

В формуле (1) константы имеют следующие значения: $E_0 = 5 \times 10^4$ В/м, $k = 1,3$, $a = 4 \times 10^7$ с⁻¹, $b = 6 \times 10^8$ с⁻¹.

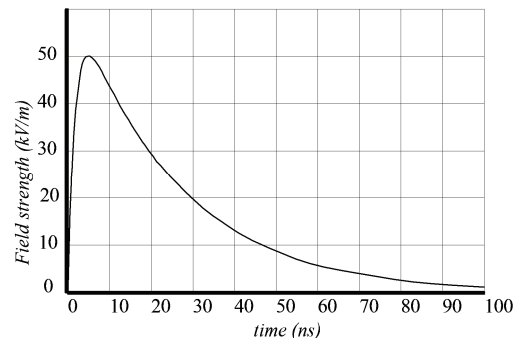


Рисунок 3 – Форма импульса электрического поля

Стандарт позволяет использовать различные варианты полеобразующих систем, например ТЕМ камеры или открытые полосковые линии. Однако геометрические размеры объекта не должны превышать размеры рабочей зоны (usable volume) полеобразующей системы, размеры которой не превышают ($H/3$, $B/2$, $A/2$), как показано на рис. 4. Рекомендовано, чтобы неоднородность поля в рабочей зоне не превышала 3 dB. Объект испытаний должен находиться на диэлектрической подставке, которая минимально искажает поле. Если испытательное оборудование расположено на заземленной плоскости в реальной установке, при испытаниях рекомендовано оборудование также располагать на заземленной плоскости полеобразующей системы. Объект испытаний должен быть связан с землей таким образом, чтобы повторять реальную установку. Испытательная площадка должна давать возможность подключить к объекту испытаний кабели для работы и мониторинга состояния. Потенциальная пластина полеобразующей системы располагается таким образом, чтобы расстояние до ближайшей заземленной поверхности был не менее $2 \times h$, где h - высота полеобразующей системы. Рекомендуется выдержать также объект испытания при относительной влажности воздуха менее 50 % в течение 24 часов. Влага из воздуха может конденсироваться на поверхности образца, в результате чего образуется частично проводящий слой, который может защитить объект испытаний во время воздействия на него электромагнитного поля. При длительном нахождении объекта в среде с низкой влажностью, образование частично проводящего слоя невозможно [1].

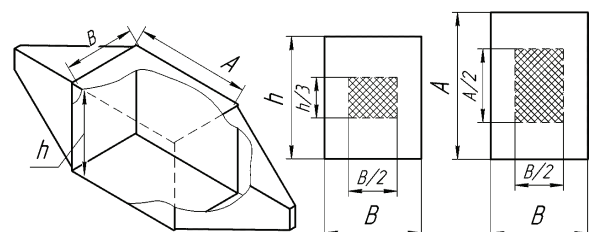


Рисунок 4 – Геометрические параметры полезного объема полеобразующей системы

Генерация и измерение радиочастотного поля в диапазоне частот выше 3 ГГц обычно является дорогостоящим и трудоемким мероприятием и связано это с необходимостью использования открытых измерительных площадок, экранированных безэховых камер, ГТЕМ или ТЕМ ячеек. Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки. Открытые измерительные площадки подвержены атмосферному воздействию и внешним помехам. Внешние поля создают дополнительные погрешности при измерениях. Атмосферные условия могут оказать влияние на искажение первоначальной формы волны электромагнитного поля. Однако, когда требуется подвергнуть воздействию объекты со значительными габаритами, очевидно, что открытые площадки являются единственным возможным вариантом.

Еще в 1974 году М.Л. Кроуфорд [4] описал ТЕМ камеру (Transverse Electromagnetic Mode). Это расширенная плоская линия передачи, работающая в режиме ТЕМ, для имитации плоской волны электромагнитного поля в свободном пространстве. Со временем конструкция ТЕМ камеры была переработана. В 1987 году Д. Кенигстейном и Д. Хансеном была создана ГТЕМ камера (Gigahertz Transverse Electro-Magnetic test cell – испытательная камера плоской электромагнитной волны гигагерцового диапазона частот), которая преодолела многие ограничения ТЕМ камеры. Конструкция ГТЕМ камеры представлена на рис. 5. Что касается перспектив использования ГТЕМ камер то в [5, 6] описан измерительный комплекс с использованием ГТЕМ камер для испытаний на ЭМС. Для создания плоской волны ЭМИ формой, описанной выражением (1), ТЕМ или ГТЕМ камера должна передавать без искажений по амплитуде и фазе весь частотный спектр ЭМИ.

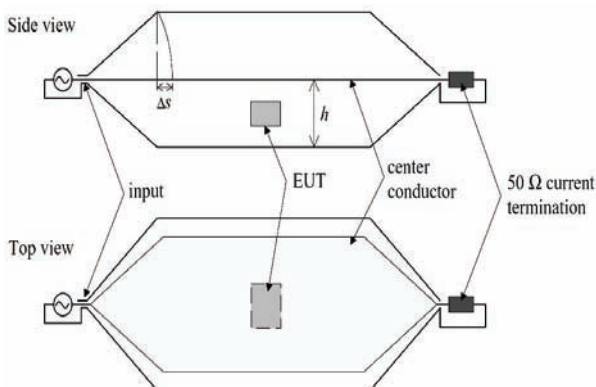


Рисунок 5 – Принципиальная схема ГТЕМ-камеры

Для создания в рабочей зоне ТЕМ камеры заданного уровня электромагнитного поля, требуемая входная мощность является намного ниже, чем в случае использования антенн в безэховых камерах. Это обстоятельство является преимуществом ТЕМ и ГТЕМ камер по отношению к антенным системам. Недостатком ТЕМ камер является ограниченный частотный диапазон, обусловленный тем, что элементы конструкции ячейки имеют различную форму. Из-за углов перехода длина внутреннего и внешнего проводника отличаются, поэтому вдоль внешнего проводника

время прохождения волны больше: $\Delta t = \Delta S/c_0$. [4].

Существует множество публикаций, посвященных обсуждению результатов расчета электромагнитных полей, образованных внутри ТЕМ и ГТЕМ камер. В случае применения открытых измерительных площадок, в отличие от ТЕМ и ГТЕМ камер, необходимо учитывать влияние посторонних заземленных предметов, неровность заземленной плоскости, учесть геометрические соотношения полеобразующей системы для создания поля в рабочей зоне с рекомендуемой неоднородностью менее ± 3 dB [1].

Выбор геометрических соотношений полеобразующей системы.

Постановка задачи. Геометрия расчетной области, свойства среды и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси z на схеме рис. 6. Рассматривается сечение моделируемого объекта, бесконечно протяженного в плоскость чертежа. Решается электростатическая задача, описываемая уравнением Пуассона относительно скалярного электрического потенциала φ : $E = -\text{grad } \varphi$. Уравнение имеет вид [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = -\rho, \quad (2)$$

где ϵ_x, ϵ_y – компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды; ρ – плотность распределенного заряда.

Величины $\epsilon_x, \epsilon_y, \rho$ являются постоянными в пределах модели. Источником поля является электрический заряд, равномерно распределенный по поверхности. Среда – воздух. Условие Дирихле задает известное значение электрического потенциала на элементе модели potential. Расчеты проведены с помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics 5.1, основанного на методе конечных элементов. Результаты расчета представлены в виде уровней равной напряженности и распределения напряженности электрического поля вдоль выбранных линий. Схематически расчетная область и линии, вдоль которых происходит построения графиков, представлены на рис. 6.

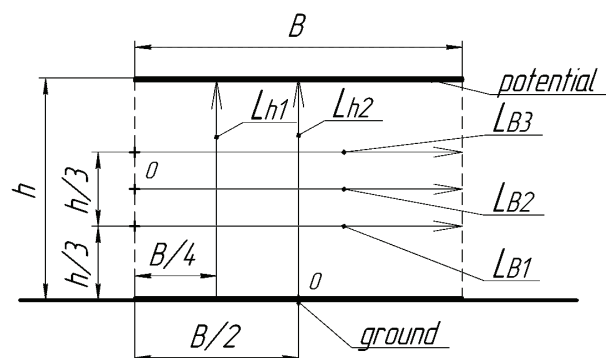


Рисунок 6 – Расчетная область и схема построения графиков

На рис. 6 приняты такие обозначения: h – расстояние между потенциальной и заземленной пластиной; B – ширина потенциального электрода. Линии, вдоль которых строятся графики: $L_{B1}, L_{B2}, L_{B3}, L_{h1}, L_{h2}, L_{h3}$.

Результаты расчета представлены на рис. 7, 8.

Обозначение графиков на рис. 7 в согласии со схемой, приведенной на рис. 6. Напряженность электрического поля представлена в относительных единицах.

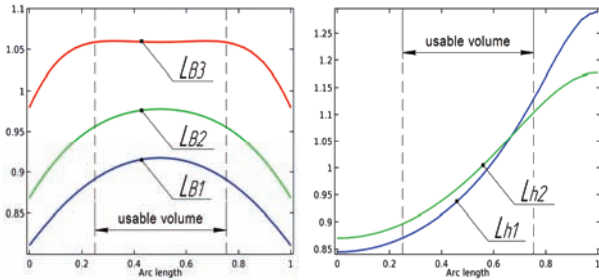


Рисунок 7 – Распределение электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы с соотношением $h/B = 1$

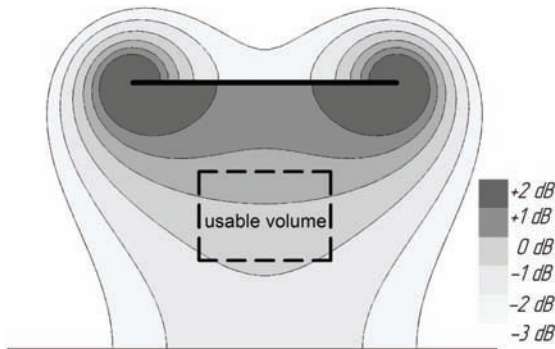


Рисунок 8 – Распределение электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы с соотношением $h/B = 1$

Неоднородность поля рабочей зоны при отношении $h/B = 1$ не более $+1/-2$ dB. При соотношении h/B более 2, неоднородность поля в рабочей зоне составляет более -3 dB.

Влияние неровностей заземленной плоскости на распределение поля в рабочем объеме полеобразующей системы. Любая поверхность имеет неровности, которые в определенной мере влияют на распространение электромагнитных волн. Существует множество публикаций, освещающих данный вопрос, при этом рассматриваются такие эффекты, как отражение, интерференция, дифракция, рассеяние, атмосферная рефракция. Все эти эффекты справедливо рассматривать, когда речь идет о распространении радиоволн над поверхностью земли с учетом больших расстояний. В общем случае учесть влияние неровностей земли не представляется возможным. Для расчетов напряженности поля в каждом случае необходимо построить профиль поверхности и производить расчет. Для определения требований к заземленной поверхности полеобразующей системы достаточно будет оценить влияние неровностей на распределение электромагнитного поля в рабочей зоне системы. Обычно в технических заданиях на изготовление ТЕМ или ГТЕМ камер указывается максимально допустимая погрешность 3 %, что справедливо и для открытого испытательного полигона. Проведение процедуры метрологической аттестации межэлектродного расстояния ТЕМ камеры представлена в [6].

Постановка задачи. Рассматривается импульс

электромагнитного поля, распространяющийся в пространстве между двумя проводящими плоскостями. Пространство между плоскостями заполнено воздухом. Модель для расчета схематично показана на рис. 9. На одном конце структуры находится сосредоточенный порт (*lumped port*), который возбуждает структуру. На порт подается сигнал возбуждения как ток с амплитудой $i(t) = u(t)/Z$, где Z является указанным характеристическим импедансом между генератором напряжения и моделью. На поверхностях модели *electric conductor* применяется граничное условие *perfect electric conductor*, так как не учитываются потери в проводниках. Скин-эффект также в расчет не принимается.

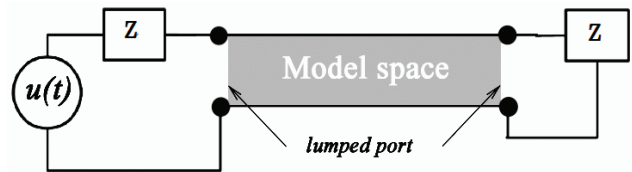


Рисунок 9 – Модель для расчета ТЕМ процесса

Сигнал, который подается на входной порт, описывается выражением (2).

$$u(t) = \frac{1}{1 + \exp(-t + a)/\tau)} \quad (2)$$

В (2) константы имеют следующие значения: $\tau = 10^{-9}$, $a = 10^8$. Функция (2) является функцией Ферми, смещенной по оси x . Выбор функции Ферми обусловлен необходимостью использовать непрерывно-дифференцируемую функцию. В некоторых случаях функцию Ферми используют как определение функции Хэвисайда, устремляя $\tau \rightarrow 0$ [7]. При заданных значениях τ и a $u(0) = 1,67 \times 10^{-5}$, что допустимо и существенного влияния на результаты расчета не оказывает. В пространстве создается плоская электромагнитная волна с амплитудой электрического поля 1 В/м, как демонстрирует рис. 10:

$$E_{\max}/H_{\max} = 1/0,00265 \approx 377 \text{ Ом.}$$

Погрешность расчетов не превышает 1 %, что допустимо, и вызвана не достаточно мелкой сеткой конечных элементов в расчетной области.

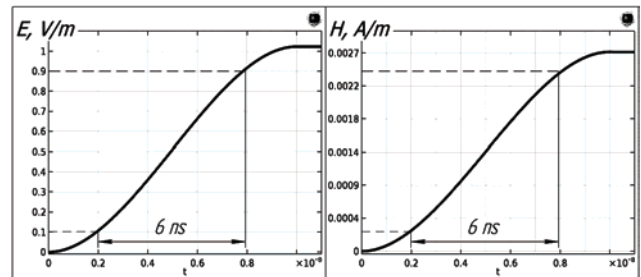


Рисунок 10 – Плоская волна в моделируемой области

В зависимости от геометрических размеров неровности, будут в той или иной степени проявляться эффекты отражения или искажения фронта волны. В случае испытательного полигона неровности заземленной плоскости изменяют межэлектродный зазор, что приводит к увеличению либо ослаблению поля, а

эфекты искажання формы волны проявляюцца незначительно. Геаметрическая длина фронта волны α между уровнями $0,1 \cdot E_{\max}$ и $0,9 \cdot E_{\max}$ (6 нс) составляет 1,8 м. Высота профиля неровности указывается относительно высоты расчетной области. Для высоты неровности $0,1 \times h$ и длины неровности менее α , искажение поля в рабочей зоне не более ± 3 dB. Процесс распространения плоской электромагнитной волны вдоль поверхностей представлен на рис. 11.

Рис. 11 представляет собой график с обозначением уровней $0,1 \cdot E_{\max}$, $0,5 \cdot E_{\max}$, $0,9 \cdot E_{\max}$, E_{\max} , $1,4 \cdot E_{\max}$ в цветовой шкале.

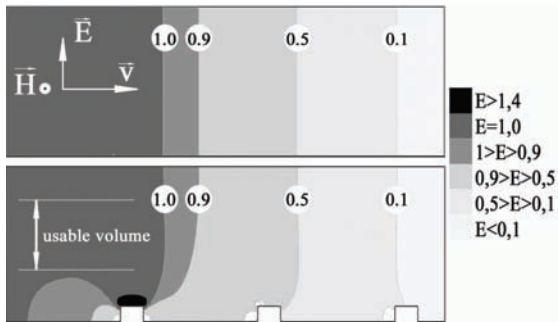


Рисунок 11 – Распределение плоской электромагнитной волны вдоль гладкой поверхности и вдоль поверхности с периодически неоднородной структурой (высота неоднородности $0,1h$)

Выводы. Проведен расчет электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы с отношением ширины и длины электродов равным 1. Неоднородность поля в рабочей зоне составила не более $+1/-2$ dB. При соотношении h/B более 2, неоднородность поля составляет более -3 dB. Показан характер влияния неровностей заземленной поверхности на распространение плоской электромагнитной волны. Для высоты неровности $0,1$ от высоты полеобразующей системы и длины неровности менее длины волны, искажение поля в рабочей зоне не более ± 3 dB.

Список литературы:

1. NATO AECTP-500:2016 Electromagnetic Environmental Effects. Test and Verification, Edition E. – Version 1. – December 2016. – 1125 p.
2. Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса / В.И. Гуревич. – М.: Инфра-

Инженерия, 2016. – 302 с.

3. MIL-STD-461G:2011 Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.

4. Crawford L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells / L. Crawford // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – November 1974. – Vol. EMC-16, No. 4.

5. Аникин В. В. Перспективы использования GTEM-камер для автоматизированных испытаний технических средств на электромагнитную совместимость / В. В. Аникин, И. Е. Бакулин, С. В. Герасимов // Системы обработки информации. – 2010. – № 6. – С. 46-48.

6. Гирка Ю.Н. Метрологическая аттестация межэлектродного расстояния в полосковых линиях эталона РЭМП / Ю.Н. Гирка // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 21. – С. 40-43.

7. Земсков В.А. Основы теории сигналов и систем. Часть 1 / В.А. Земсков. – Саратов: СВВКИУ, 2004. – 132 с.

References (transliterated)

1. NATO AECTP-500:2016 Electromagnetic Environmental Effects. Test and Verification, Edition E. Version 1. December 2016. 1125 p.
2. Gurevich V.I. Zashhita oborudovaniya podstancij ot jelektromagnitnogo impul'sa. [Protection of substation equipment against electromagnetic impulse]. Moscow, Ingeniering, 2016. 302 p.
3. MIL-STD-461G Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007
4. Crawford L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. November 1974. Vol. EMC-16, No. 4.
5. Anikin V.V. Perspektivy ispol'zovanija GTEM-kamer dlja avtomatizirovannyh ispytaniy tehniceskikh sredstv na jelektromagnitnuju sovmestimost' [Prospects of the use of gtem-kamer for the automated tests of hardwares on electromagnetic compatibility]. Information processing systems. Available at: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/7812/eng>
6. Girka Ju. N. Metrologicheskaja attestacija mezhelektrodnogo rasstojanija v poloskovykh linijah jetalona RJEMP [Definition of interelectrode distance is presented in the strip lines of Etalon PEMF] Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Available at: <http://vestnik.kpi.kharkov.ua>.
7. Zemskov V. A. Osnovy teorii signalov i sistem. Chast' 1. [Fundamentals of the theory of signals and systems. Part 1] Saratov: SVVKIU, 2004. 132 p.

Поступила (received) 17.03.2017.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особливості формування імпульсного електромагнітного поля в полосковій лінії / С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 98-102. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Особенности формирования импульсного электромагнитного поля в полосковой линии / С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 98-102. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Formation of the impulse electromagnetic field in the strip line / S. P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 98-102.. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаламов Станіслав Павлович – молодший науковий співробітник; аспірант НТУ «ХПІ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

Шаламов Станіслав Павлович – младший научный сотрудник; аспирант НТУ «ХПІ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

Shalamov Stas Pavlovich – Research Assistant; Postgraduate Student NTU «KPI»; tel.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.