

УДК 621.396.67

*А.И. КОРОБКО, З.И. КОРОБКО***МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННАХ ВО ВРЕМЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ**

Наведено обґрунтування і опис розробленої методики фізичного моделювання імпульсних електромагнітних процесів в надширокополосних антенах у часовому представленні. Експериментальна методика фізичного моделювання дозволяє визначити просторово-часові і амплітудно-часові характеристики імпульсного електромагнітного поля, яке випромінюється антеною, а також характеристики антени як елемента радіосхем. Наведено опис і характеристики основних складових частин фізичної моделі: імпульсного джерела живлення, антени, системи вимірювання та реєстрації просторово-часових і амплітудно-часових параметрів імпульсного електромагнітного поля. Представлені експериментальні результати по визначенню основних характеристик складових частин фізичної моделі. Розроблено методику визначення основних метрологічних характеристик системи вимірювання часових параметрів імпульсного електромагнітного поля. Як приклад представлені результати фізичного моделювання взаємодії електромагнітного поля в далекій зоні V-подібної антени з об'єктом впливу.

Ключові слова: методика фізичного моделювання, фізична модель, часове представлення, імпульсне електромагнітне поле, випромінювання, просторово-часові параметри, амплітудно-часові параметри.

Приведено обоснование и описание разработанной методики физического моделирования импульсных электромагнитных процессов в сверхширокополосных антеннах во временном представлении. Экспериментальная методика физического моделирования позволяет определить пространственно-временные и амплитудно-временные характеристики импульсного электромагнитного поля, которое излучается антенной, а также характеристики антенны как элемента радиосхем. Приведено описание и характеристики основных составных частей физической модели: импульсного источника питания, антенны, системы измерения и регистрации пространственно-временных и амплитудно-временных параметров импульсного электромагнитного поля. Представлены экспериментальные результаты по определению основных характеристик составных частей физической модели. Разработана методика определения основных метрологических характеристик системы измерения временных параметров импульсного электромагнитного поля. В качестве примера представлены результаты физического моделирования взаимодействия электромагнитного поля в дальней зоне V-образной антенны с объектом воздействия.

Ключевые слова: методика физического моделирования, физическая модель, временное представление, импульсное электромагнитное поле, излучение, пространственно-временные параметры, амплитудно-временные параметры.

The justification and description of the developed technique for physical simulation of pulsed electromagnetic processes in ultra-wideband antennas is presented in a temporary presentation. The experimental technique of physical modeling allows to determine the space-time and amplitude-time characteristics of the pulsed electromagnetic field, which is emitted by the antenna and also the characteristics of the antenna as an element of the radio circuits. The description and characteristics of the main components of the physical model are given: an impulse power supply, antennas, a system for measuring and recording the space-time and amplitude-time parameters of a pulsed electromagnetic field. Experimental results are presented for the determination of the main characteristics of the constituent parts of the physical model. A method for determining the basic metrological characteristics of a system for measuring the time parameters of a pulsed electromagnetic field has been developed. As an example, the results of physical modeling of the interaction of an electromagnetic field in the far zone of a V-shaped antenna with an object of influence are presented.

Keywords: physical modeling technique, physical model, time representation, pulsed electromagnetic field, radiation, space-time parameters, amplitude-time parameters.

Введение. Сверхширокополосные (СШП) антенны применяются для излучения и приема электромагнитных сигналов в широком частотном диапазоне.

СШП антенны могут использоваться в двух принципиально различных режимах: для относительно узкополосных сигналов, когда свойство широкополосности позволяет работать в различных частотных диапазонах поочередно; для СШП импульсных сигналов с широким спектром.

Первый режим типичен для задач радиосвязи, радимониторинга и узкополосной радиолокации, второй режим характерен для генерации и приема мощных электромагнитных импульсов (имитация электромагнитных импульсов ядерных взрывов, генерация импульсных электромагнитных помех, СШП видеоимпульсная локация и др.).

Соответственно разнятся и виды представлений типовых характеристик антенн в этих режимах: час-

отное (например, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики) для первого режима; временное (пространственно-временные параметры ПВП) и амплитудно-временные параметры (АВП) для второго режима. Последние характеристики определяют как полевые нестационарные электромагнитные процессы в СШП антеннах, так и переходные процессы в электрических цепях схемы замещения антенны совместно с источником ее питания.

Существующие методы решения. Задача исследования нестационарных импульсных электромагнитных процессов в СШП антеннах является очень сложной и не имеет строгого аналитического решения.

Все существующие аналитические и численные подходы к решению данной проблемы базируются исключительно на приближенных методах.

Аналитические методы решения можно условно разделить на схмотехнические и полевые. Суть схмотехнических методов состоит в замене СШП антенны ее эквивалентной схемой замещения, определении токов и напряжений на элементах СШП антенны и определении ее характеристик на основе полученных токов и напряжений. Исторически первым данным подход к СШП антенне в виде биконуса применил Шелкунов [1], который представил биконусную антенну конечных размеров в виде эквивалентной схемы, состоящей из регулярной линии в Т-приближении, нагруженной на конце последовательно соединенными активным сопротивлением (имитация потерь на излучение) и емкостным элементом (имитация краевых эффектов и самого излучения). Данный подход получил свое развитие для СШП антенн в виде симметричного ТЕМ рупора в работах [2,3]. Недостатком данного подхода является его искусственность, заключающаяся в необходимости распространения полученных данных в виде токов и напряжений на полевые характеристики антенн.

Один из аналитических полевых методов базируется на получении аналитических выражений для основного типа волн в СШП антеннах (это, как правило, волны типа Т), волн высших типов (волны Е- и Н-типов) и последующей шивкой полученных решений с учетом граничных и начальных условий [4]. Недостаток данного подхода – ограниченность типов СШП антенн, для которых этот подход применим и сложность аналитического решения. Другой аналитический полевой подход базируется на принятых физических допущениях при решении уравнений Максвелла. Так, в работе [5] на основании приближений геометрической оптики были получены приближительные решения для АВП импульсного электромагнитного поля, генерируемого в дальней зоне СШП антенной типа IRA. В силу принятых допущений полученные решения были неточными по АВП и не давали ответ на вид ПВП.

Численные методы решения в настоящее время получили наибольшее распространение [6 - 14] в силу развития вычислительной техники, их общими недостатками являются: ограниченность пространства, в котором полученные решения являются корректными; крайняя сложность учета влияния параметров импульсного источника питания СШП антенн на ПВП и АВП генерируемого поля.

Свободным от указанных недостатков является методология физического моделирования нестационарных импульсных электромагнитных процессов, реализованная в [15]. При этом были использованы дорогостоящие уникальные стандартные приборы и нестандартные средства измерений:

- средства регистрации АВП (регистратор однократных импульсов Tektronix TDS 6604B, полоса 6 ГГц, стробоскопические осциллографы: TMR7218, полоса рабочих частот 18 ГГц, в защищенном от электромагнитных воздействий исполнении; Tektronix DSA 8200, полоса 30 ГГц);

- тестовые генераторы электрических импульсов субнаносекундной длительности (с амплитудой от 1 В

до 40 В и с длительностью перепада напряжения от 13 пс);

- средства измерения импульсных высоковольтных напряжений и напряженности электрического поля импульсного излучения с длительностью фронта переходной характеристики не хуже 20 пс.

Перечисленные приборы и средства измерений по своим техническим характеристикам позволяют производить физическое моделирование нестационарных импульсных электромагнитных процессов для импульсов с шириной спектра до 2–7 ГГц, однако, приведенные характеристики не учитывают двух важных факторов, дополнительно ограничивающих максимальную ширину спектра:

- все вышеперечисленные приборы и средства измерения имеют входные и выходные активные импедансы, равные 50 Ом;

- кабельные линии передачи аналоговых сигналов (в виде коаксиальных кабелей) от тестовых генераторов до СШП и от измерителей до регистраторов также имеют импеданс, равный 50 Ом.

Первый фактор существенно ограничивает номенклатуру моделируемых СШП антенн (они должны иметь аналогичный импеданс, или дополнительное устройство сверхширокополосного согласования с импедансом 50 Ом). Кроме этого, оба фактора уменьшают ширину спектра исследуемых импульсов с теоретически возможной максимальной величины 2–7 ГГц до существенно меньших значений, обусловленных влиянием потерь в коаксиальных кабелях конечной длины.

Данный момент иллюстрирует рис. 1, на котором представлены переходные характеристики реального коаксиального кабеля с учетом потерь в проводниках и диэлектрике для различных длин [16].

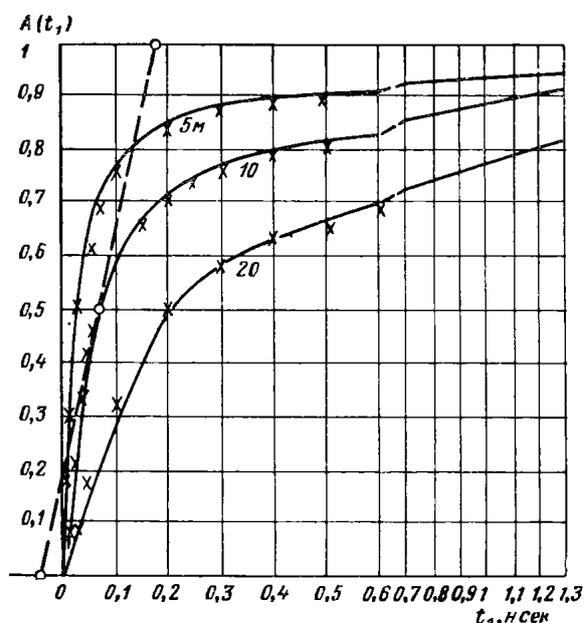


Рисунок – 1 Переходные характеристики кабеля РК-75-4-15 длиной 5, 10 и 20 м с учетом потерь в проводниках и диэлектрике.

Как видно из представленных данных, реальные

коаксиальные кабели конечной длины существенно уменьшают максимально допустимую ширину спектра исследуемых импульсов (до 0,5 ГГц для одного рассматриваемого кабеля длиной 5 м).

Целью работы является разработка и практическая реализация методики физического моделирования свободной от ограничений по величине импеданса импульсного источника питания и ширине частотного спектра.

Задача разработки и практической реализации методики физического моделирования включает в себя методологическую и аппаратную части.

В методологическом аспекте единственным выходом для исследования АВП и ПВП нестационарного импульсного электромагнитного поля с реальной шириной спектра до 10–50 ГГц является масштабное физическое моделирование.

Суть предлагаемого метода масштабного физического моделирования состоит в одновременном увеличении геометрических размеров физических моделей реальных СШП антенн (по сравнению с реальными антеннами) с одновременной «растяжкой» по времени электромагнитных процессов в модели [17]. При этом ширина спектра электромагнитного поля модели СШП антенны уменьшается (коэффициент уменьшения равен коэффициенту геометрического масштабирования), что позволяет использовать более низкочастотные приборы.

Погрешности такого физического моделирования определяются исключительно разностью активных потерь в проводниках самой СШП антенны и ее модели (явление скин-эффекта), а также в диэлектрических средах, окружающих моделируемую антенну и ее физическую модель [17]. Для реальных конструкций СШП антенн эти погрешности не превосходят нескольких процентов, так как электроды антенн выполняются из хорошо проводящих материалов, а потерями в воздухе можно пренебречь в отсутствие электрического пробоя.

Аппаратная часть физической модели, реализованная применительно к моделированию нестационарных электромагнитных процессов в симметричном регулярном ТЕМ рупоре, показана на рис. 2, а блок-схема физической модели для определения АВП исследуемого электромагнитного поля представлена на рис. 3.

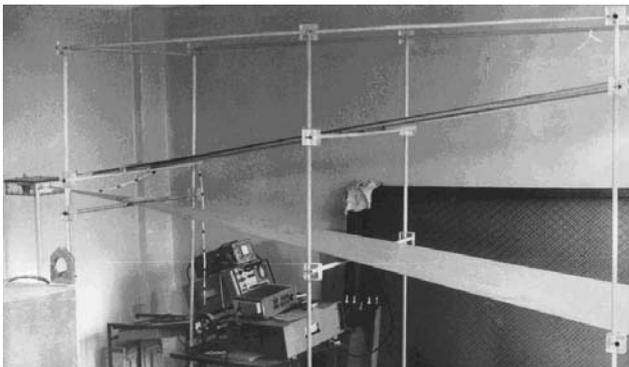


Рисунок 2 – Общий вид физической модели

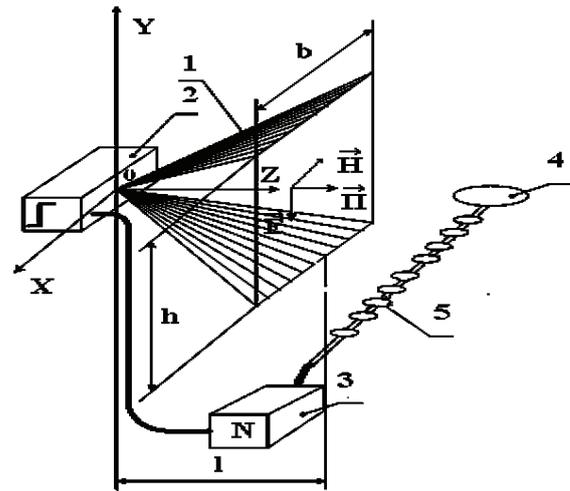


Рисунок 3 – Блок-схема физической модели для определения АВП нестационарного импульсного электромагнитного поля симметричного регулярного ТЕМ рупора: 1 – ТЕМ рупор, 2 – импульсный источник питания, 3 – осциллографический регистратор, 4 – измерительный преобразователь E- и H-составляющих электромагнитного поля, 5 – кабельная линия передачи информации

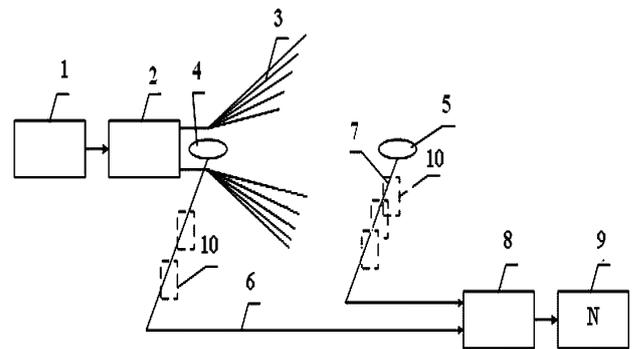


Рисунок 4 – Блок-схема физической модели для определения ПВП нестационарного импульсного электромагнитного поля симметричного регулярного ТЕМ рупора: 1 – блок питания, 2 – импульсный источник питания, 3 – ТЕМ рупор, 4 – опорный измерительный преобразователь, 5 – основной измерительный преобразователь E- и H-составляющих электромагнитного поля, 6 – кабельные линии передачи информации, 7 – устройства квазигальванической развязки, 8 – дифференциатор, 9 – осциллографический регистратор

Для определения ПВП исследуемого электромагнитного поля была реализована конфигурация физической модели, представленная на рис. 4.

При этом были использованы два измерительных преобразователя, один из которых помещался в фиксированную точку 0 (см. рис. 3), а второй перемещался по исследуемому объему.

По разности времен прихода электрических импульсных сигналов можно определить ПВП излучаемого электромагнитного поля и определить такую важную характеристику СШП антенны как ее фазовый центр.

Система измерения АВП параметров состоит из измерителей E и H – составляющих импульсного электромагнитного поля. Общий вид измерителей представлен на рис. 5, 6, а блок-схема измерителя применительно к E – составляющей поля – на рис. 8.

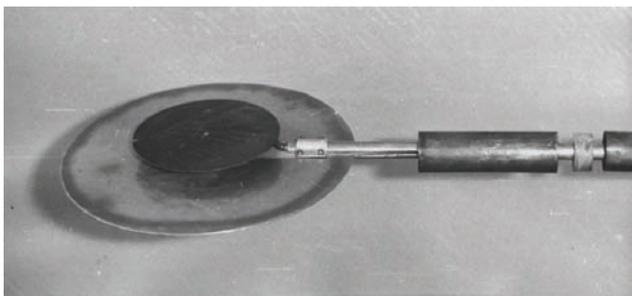


Рисунок 5 – Общий вид дифференциального измерителя E-составляющей с элементами квазигальванической развязки

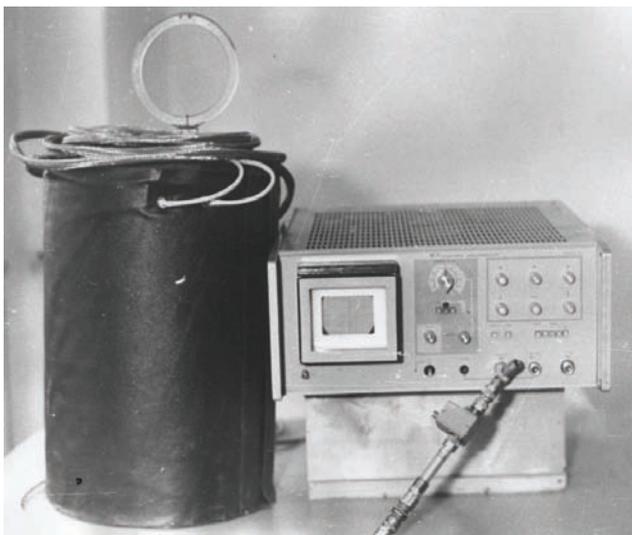


Рисунок 6 – Общий вид измерителя H-составляющей в составе: дифференциальный индукционный измерительный преобразователь, кабельная линия передачи информации, дифференциальный кабельный трансформатор; скоростной осциллографический регистратор типа С7-19

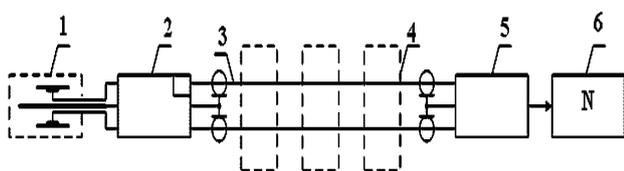


Рисунок 7 – Блок-схема дифференциального измерителя E-составляющей: 1 – дифференциальный измерительный преобразователь емкостного типа, 2 – дифференциальный СШП усилитель, 3 – кабельная линия передачи информации, 4 – элементы квазигальванической развязки, 5 – дифференциальный трансформатор, 6 – осциллографический регистратор

В качестве измерительных преобразователей использованы пассивные преобразователи индукционного и емкостного типов с RL и RC пассивными интеграторами соответственно.

Системы измерения АВП и ПВП параметров имеют одинаковые характеристики (без учета дифференциатора 8 на рис. 4).

Время нарастания при использовании в качестве регистраторов стробоскопического осциллографа С7-7 и скоростного осциллографа С7-19 не превышает 0,5 нс.

Минимальные величины регистрируемых максимальных значений E- и H-составляющих электромаг-

нитного поля не превышают 0,3 В/м и 0,8 мА/м соответственно и ограничены, в основном, уровнем электромагнитных помех в месте размещения физической модели.

Максимальные значения измеряемых полей – не менее 1000 кВ/м и 2650 А/м (без усилителя 2 на рис. 8).

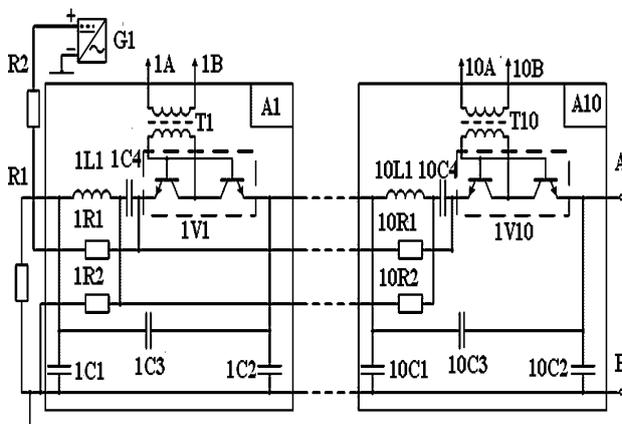


Рисунок 8 – Схема импульсного источника питания физической модели (вариант по схеме Аркадьева – Маркса)

Для физической модели был разработан импульсный источник питания (см. рис. 8), который состоит из функционально законченных блоков А1 – А10, число, конфигурация и параметры которых определяются требованиями по АВП импульсных напряжений и токов, которые необходимо подавать на вход СШП антенны (точки А и В).

Каждый из блоков включает в себя накопительные элементы распределенного или сосредоточенного типа (в данном варианте – конденсаторы 1С4 – 10С4), элементы формирования АВП (1L1 – 10L1, C1 – 10C1, 1C2 – 10C2, 1C3 – 10C3), зарядные резисторы R2, 1R1 – 10R1, 1R2 – 10R2, транзисторные двухсторонние коммутаторы 1V1 – 10V1, источник питания G1. Резистор R1 определяет внутреннее сопротивление импульсного источника питания, которое может существенно отличаться от стандартной величины 50 Ом как в большую, так и в меньшую сторону. Включение коммутаторов возможно по любой временной циклограмме, оно обеспечивается подачей на выходы 1А, 1В – 10А, 10В импульсных трансформаторов 1Т1 – 10Т1 управляющих запускаяющих импульсов. Максимальное рабочее напряжение одного блока – до 300 В, время нарастания тока – более 0,5 нс.

Данные параметры импульсного источника питания позволяют получать на входе СШП антенны субнаносекундные и наносекундные импульсы напряжения с максимальным значением до 3 кВ.

Результаты экспериментальных исследований. Для подтверждения основных характеристик модели предварительно были определены полевые переходные характеристики измерителей E- и H-составляющих, а также время нарастания фронта импульса выходного напряжения импульсного источника питания в самом «жестком» режиме его работы –

на активную нагрузку 5 Ом.

Для определения полевой переходной характеристики измерителей была использована физическая модель, представленная на рис. 2, измерительные преобразователи помещались на оси OZ модели при $0 < Z < 1$ (см. рис. 3). При этом, временные параметры импульсного электромагнитного поля в точке размещения измерительных преобразователей соответствовали аналогичным параметрам импульса напряжения в точках А и В рис. 8, а характеристики максимальных значений определялись из [4] (как компоненты сферической Т – волны без учета отражений).

Типовая полевая переходная характеристика измерителей представлена на рис. 9.

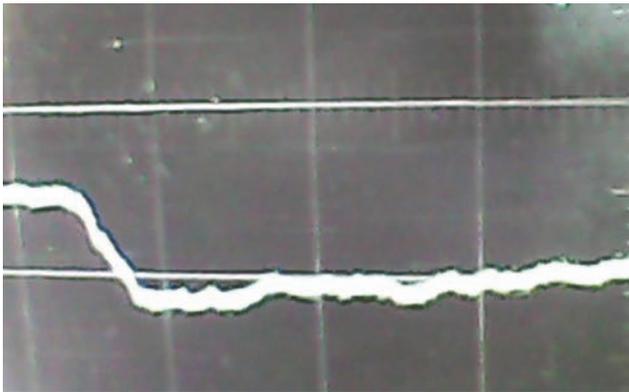


Рисунок 9 – Типовая полевая переходная характеристика измерителей (1 нс/ дел., осциллограф С7-7)

Осциллограмма напряжения на выходе импульсного источника питания на нагрузке 5 Ом (режим одновременного срабатывания коммутаторов, накопительные элементы – коаксиальные линии) приведена на рис. 10.

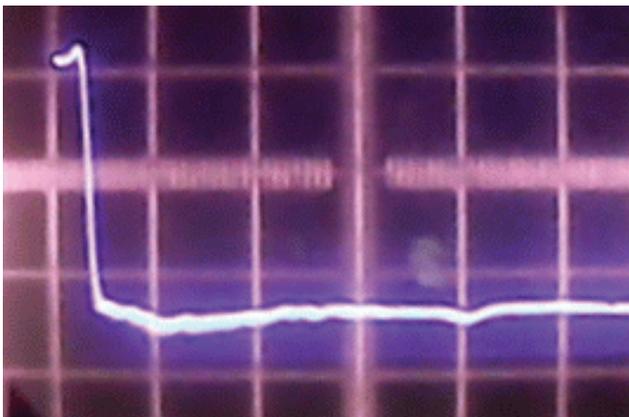


Рисунок 10 – Напряжение на выходе импульсного источника питания (2,5 нс/дел., осциллограф С7-19)

Типовая осциллограмма для определения ПВП электромагнитного поля представлена на рис. 11. При этом импульсный источник питания генерировал импульсы типа импульса Гаусса, опорный измерительный преобразователь помещался в точке $X = Y = Z = 0$ (см. рис. 4), а основной преобразователь – в искомой точке.

По временному интервалу между импульсами

можно определить время запаздывания в искомой точке и, таким образом, пространственно – временную структуру импульсного электромагнитного поля (в том числе и фазовый центр СШП антенны).

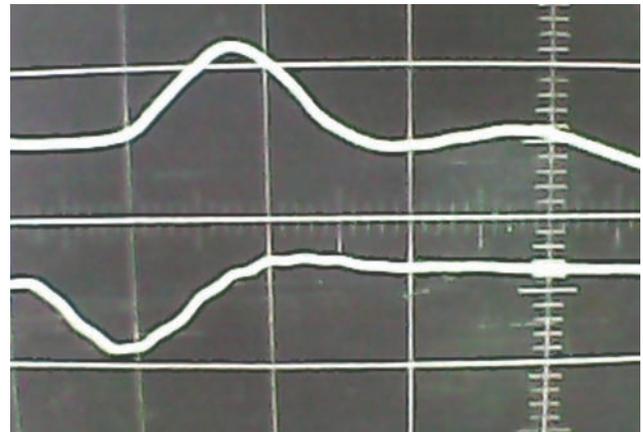


Рисунок 11 – Типовая осциллограмма для определения ПВП (нижний луч – опорный измеритель, верхний луч – основной измеритель, 1 нс/дел., осциллограф С7 - 7)

Для иллюстрации возможностей предложенного метода физического моделирования и подтверждения технических характеристик модели было проведено моделирование процессов в V – антенне, численное решение для поля которой в дальней зоне было получено в [14] для случая возбуждения антенны импульсом напряжения типа импульса Гаусса.

Типовая осциллограмма поля в дальней зоне, полученная на физической модели представлена на рис. 12, а определенное двумя типами численных методов поле в дальней зоне [14] – на рис. 13.



Рисунок 12 – Поле в дальней зоне, физическое моделирование (V – антенна, длина плеч 60 см, угол раскрытия 60°, 10 нс /дел., осциллограф С7-7)

Сравнение данных физического моделирования и численных методов расчета показывает, что при общем совпадении характера изменения поля в дальней зоне после первого периода колебаний наблюдается существенное отличие численных и экспериментальных данных для первого периода.

Это отличие заключается в появлении необъяснимого с физической точки зрения первого отрицательного полупериода колебаний на рис. 13.

Данный факт свидетельствует о том, что предло-

женный метод физического моделирования позволяет получать более достоверные результаты по сравнению с расчетными методами.

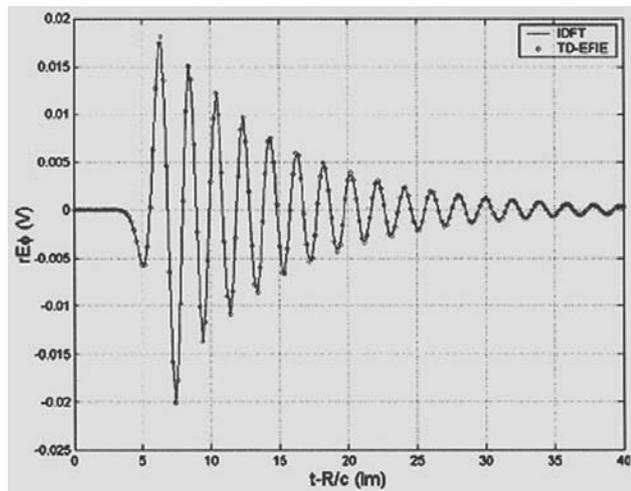


Рисунок 13 – Поле в дальней зоне, численное решение [14] (V – антенна, длина плеч 60 см, угол раскрыва 60°)

Заключение. Разработанный и практически реализованный метод физического моделирования с масштабированием геометрических размеров СШП антенн и расширенным диапазоном импедансов импульсных источников их питания позволяет достоверно моделировать нестационарные импульсные электромагнитные процессы для любых типов СШП антенн с питанием их импульсами напряжения и тока.

Список литературы:

1. Шелкунов С.А. Антенны / С.А.Шелкунов, Г. А. Фриис. Пер. с англ. Под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Сов. радио, 1955. – 604 с.
2. Макурин М.Н. Эквивалентная схема, моделирующая входной импеданс биконической антенны / М.Н. Макурин, В.В. Кирьяшкин, Н.П. Чубинский // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г. – Москва. – С. 12-16. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/files/a003.pdf>
3. Коробко А.И. Определение коэффициента отражения от открытой апертуры биконической антенны и регулярного TEM рупора симметричного типа в частотном и временном представлении методом имитационного моделирования / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХП», Серія «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 36 (1208). – С. 42-46.
4. Коробко А.И. Решение задачи распространения Т-волны в конической линии / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Електроенергетика та перетворююча техніка». – Х.: НТУ «ХП», 2003. – № 1. – С. 109-112.
5. Podosenov S.A. Transient radiation of traveling waves by ire antennas// S.A. Podosenov, Y.G. Svekis, A.A. Sokolov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – Aug. 1995. – Vol. 37, No 3. – PP. 367-383.
6. Kao Ch.-P. Design and Analysis of UWB TEM Horn Antenna for Ground Penetrating Radar Applications / Ch.-P. Kao, J. Li, R. Liu // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 6-11 2008, Boston, USA. – P. 569-572.
7. Tan A.E.-Ch. Design of Transverse Electromagnetic Horn for Concrete Penetrating Ultra-Wideband Radar / A.E.-Ch.

Tan, K. Jhamb, K. Rambabu // Antennas and Propagation, IEEE Transactions. – Vol. 60, Is. 4. – PP. 1736-1743.

8. Ефимова Н.А. Минимизация искажений диаграммы направленности рупорных антенн в сверхширокой полосе частот / Н.А. Ефимова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 1. – С. 39-44. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-iskazheniy-diagrammy-napravlenosti-rupornyh-antenn-v-sverhshirokoy-polose-chastot>

9. Калугин Д.С. О визначенні часових характеристик короткоімпульсних антен методом Кірхгофа-Котлера / Д.С. Калугин, М.Г. Іванець, А.М. Безверхий // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 4. – С. 99-101.

10. Franek O. Spherical Horn Array for Wideband Propagation Measurements / O. Franek, G. Friis // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Vol. 59, Is. 7. – PP. 2654-2660. – Режим доступа: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2108>

11. Макурин М.Н. Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей / М.Н. Макурин, Н.П. Чубинский // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52. № 10. – С. 1199 -1208. – Режим доступа: <http://naukarus.com/raschet-harakteristik-bikonicheskoy-antenny-metodom-chastichnyh-oblastey>

12. Моделирование антенн в ANSYS HFSS. – Режим доступа: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fcae-expert.ru%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmodelirovanie_antenn_vansys_hfss.pdf&name=modelirovanie_antenn_v_ansys_hfss.Pdf&lang=ru&c=58d6a273d428

13. Моделирование антенн. Советы при моделировании использованием CST STUDIO SUITE. – Режим доступа: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fwww.eurointech.ru%2Fproducts%2FCST%2FCST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&name=CST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&lang=ru&c=58d6a2f71fb7

14. Ji I. Solving Time Domain Electric Field Integral Equation for Thin-Wire Antennas Using the Laguerre Polynomials / I. Ji, I.T.K. Sarkar, I.B.H. Jung, Salazar-M. Palma // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7, Edited by Frank Sabath, Eric L. Mokole, Uwe Schenk and Daniel Nitsch. – Library of Congress, Control Number: 2006939573. Springer Science-Business Media, LLC, 2007, New York, USA. – PP. 159-171.

15. Лаборатория № 41 СИ ТЭС: Лаборатория мощных электромагнитных воздействий. – Режим доступа: pandia.ru/text/78/045/38895.php

16. Моругин Л.А. Наносекундная импульсная техника / Л.А. Моругин, Г.В. Глебович. – М.: Сов. радио, 1964. – 628 с.

17. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. / В.А. Веников. – М.: «Высш. школа», 1976. – 479 с.

References (transliterated):

1. Shchelkunov S.A., Friis G. A. Antenny [Antennas]. Per. s angl. Pod red. Bakhraha L.D. Moscow: Sov. radio, 1955. 604 p.
2. Makurin M.N., Kir'yashkin V.V., Chubinskiy N.P. Ekvivalentnaya skhema, modeliruyushchaya vkhodnoy impedans bikonicheskoy anteny [Equivalent circuit simulating the input impedance of a biconical antenna]. III Vserossiyskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz» – IRE RAN, 26-30 oktyabrya 2009 g. Moskov. pp. 12-16. Internet: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/files/a003.pdf>
3. Korobko A.I., Korobko Z.I. Opredelenie koeffitsienta otrazheniya ot otkrytoy apertury bikonicheskoy anteny i regul'yarnogo TEM rupora simmetrichnogo tipa v chastotnom i vremennom predstavlenii metodom imitatsionnogo modelirovaniya [Determination of the reflection coefficient from the open aper-

ture of a biconical antenna and a regular symmetric-type horn TEAM in frequency and time representation by the simulation simulation method]. *Visnik NTU «KhPI»*, Seriya «Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug». Kharkiv: KhPU «KhPI», 2016. No 36 (1208). PP. 42-46.

4. Korobko A.I., Korobko Z.I. Reshenie zadachi rasprostraneniya T – volny v konicheskoy linii [Solution of the problem of propagation of a T - wave in a conical line]. *Visnik NTU «KhPI»*. Tematichnyi vipusk «Elektroenergetika ta peretvoryuyucha tekhnika». Kharkiv: KhPU «KhPI», 2003. No 1. PP. 109-112.

5. Podosenov S.A., Svekis Y.G., Sokolov A.A. Transient radiation of traveling waves by ire antennas. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Aug. 1995. Vol. 37, No 3. PP. 367-383.

6. Kao Ch.-P., Li J., Liu R. Design and Analysis of UWB TEM Horn Antenna for Ground Penetrating Radar Applications. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 6-11 2008, Boston, USA. PP. 569-572.

7. Tan A.E.-Ch., Jhamb K., Rambabu K. Design of Transverse Electromagnetic Horn for Concrete Penetrating Ultra-Wideband Radar. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*. Vol. 60, Is. 4. PP. 1736-1743.

8. Efimova N.A. Minimizatsiya iskazheniy diagrammy napravlenosti rupornykh antenn v sverkhshirokoy polose chastot [Minimization of the distortions of the directivity pattern of horn antennas in the ultra-wide frequency band]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*. 2015. No 1. PP. 39-44. Internet: <http://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-iskazheniy-diagrammy-napravlenosti-rupornykh-antenn-v-sverkhshirokoy-polose-chastot>

9. Kaluhyn D.S., Ivanets' M. H., Bezverkhyy A. M. O vyznachenni chasovykh kharakterystyk korotkoimpul'snykh anten metodom Kirkhgofa-Kotlera [On determining the short-time characteristics of antennas by Kirkhoff-Kotler]. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika*. 2012. No 4. PP. 99-101.

10. Franek O., Frshlund Pedersen G. Spherical Horn Array for Wideband Propagation Measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. Vol. 59, Isd. 7. PP. 2654-2660. Internet: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2108>

11. Makurin M.N., Chubinskiy N.P. Raschet kharakteristik bikonicheskoy anteny metodom chastichnykh oblastey [Calculation of the characteristics of a biconical antenna by the partial regions method]. *Radiotekhnika i elektronika*. 2007. Vol. 52. No 10. PP. 1199-1208. Internet: <http://naukarus.com/raschet-kharakteristik-bikonicheskoy-antenny-metodom-chastichnyh-oblastey>

12. Modelirovanie antenn v ANSYS HFSS [Simulation of antennas in ANSYS HFSS]. Internet: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fcae-expert.ru%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmodelirovanie_antenn_vansys_hfss.pdf&name=modelirovanie_antenn_v_ansys_hfss.Pdf&lang=ru&c=58d6a273d428

13. Modelirovanie antenn. Sovety pri modelirovanii ispol'zovaniem CST STUDIO SUITE [Simulation of antennas. Tips for modeling using CST STUDIO SUITE]. Internet: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fwww.eurointech.ru%2Fproducts%2FCST%2FCST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&name=CST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&lang=ru&c=58d6a2f71fb7

14. Ji I., Sarkar I. T. K., Jung I. B. H., Salazar-M. Palma Solving Time Domain Electric Field Integral Equation for Thin-Wire Antennas Using the Laguerre Polynomials. *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7*, Edited by Frank Sabath, Eric L. Mokole, Uwe Schenk and Daniel Nitsch. Library of Congress, Control Number: 2006939573. Springer Science-Business Media, LLC, 2007, New York, USA. PP. 159-171.

15. Laboratoriya №41 SI TES: Laboratoriya moshchnykh elektromagnitnykh vozdeystviy [Laboratory № 41 SI TPP: Laboratory of powerful electromagnetic influences]. Internet: <pandia.ru/text/78/045/38895.htm>

16. Morugin L.A., Glebovich G.V. Nanosekundnaya impul'snaya tekhnika [Nanosecond pulse technology]. *Moscow: Sov. radio*, 1964. 628 p.

17. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki) [Theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry)]. *Ucheb. posobie dlya vuzov. Izd. 2-e, dop. i pererab. Moscow: «Vyssh. shkola»*, 1976. 479 p.

Поступила (received) 14.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика фізичного моделювання електромагнітних процесів у надширокополосних антенах у часовому представленні / А. І. Коробко, З. І. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 49-55. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0740.

Методика физического моделирования электромагнитных процессов в сверхширокополосных антеннах во временном представлении / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 49-55. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0740.

Method of physical modelling of electromagnetic processes in ultra-wideband antennas in time representation / A. I. Korobko, Z. I. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 49-55. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коробко Анатолій Іванович – кандидат технічних наук, завідувач відділу НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Коробко Анатолій Іванович – кандидат технических наук, заведующий отделом НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@uke.net

Korobko Anatoliy Ivanovich – Philosophy Doctor, Head of Department of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", phone: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Коробко Зінаїда Іванівна – науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Коробко Зинаида Ивановна – научный сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057)707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Korobko Zinaida Ivanovna – Researcher, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", phone: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net