

П. В. Холод, Л. А. Варяница-Рощупкіна, Т. Н. Огурцова
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: PavloKh@ukr.net

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ БОЛЬШАЯ РАМОЧНАЯ АНТЕННА ДЛЯ ПРИЕМА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЕЙ

На основе анализа результатов моделирования пространственно-временных распределений токов, индуцированных электрической и магнитной компонентами поля в круглой и прямоугольных рамках, выяснены причины возникновения послепульсных колебаний токов в электрически больших рамочных антеннах. Установлено, что искажение формы импульса обусловлено наличием тока, индуцированного электрической компонентой падающего поля. Для неискаженного приема из общего тока необходимо выделять ток, наведенный магнитной компонентой. Экспериментально подтверждено, что неискаженный прием можно обеспечить путем суммирования сигналов, регистрируемых в диаметрально противоположных участках круглой рамки. Ил. 12. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: рамочная антенна, сверхширокополосные антенны, ЭДС, пространственно-временное распределение токов.

Рамочные антенны являются широко распространенным средством передачи и приема электромагнитных (ЭМ) волн. В качестве приемной такая антенна использовалась еще Г. Герцем в его трудах по распространению ЭМ-волн в свободном пространстве [1]. С тех пор рамочные антенны не только не потеряли своей актуальности, но и продолжают расширять область применения, становясь неотъемлемой частью новых радиотехнических устройств [2, 3].

Обычно рамочные антенны разделяют на два типа. Это электрически малые антенны (периметр рамки меньше длины волны) и электрически большие антенны (периметр рамки больше или равен длине волны) [4]. Электрически малые рамочные антенны широкополосны [5–7]. Благодаря этому они получили широкое распространение в качестве приемных антенн малогабаритных широкодиапазонных радиоприемников и радионавигационной аппаратуры, а также используются как датчики напряженности электрических и магнитных полей. Электрически большие рамочные антенны используются, в основном, как передающие антенны или сравнительно узкополосные приемные антенны, так как обладают выраженными резонансными свойствами.

Интерес к приемным рамочным антеннам как датчикам напряженности сверхширокополосных (СШП) импульсных полей возник еще в 1960-х годах [8–13]. Это были электрически малые рамки. Однако из-за малой чувствительности они не нашли широкого применения в СШП импульсных радиолокационных системах. Под чувствительностью в данном случае понимается отношение изменения амплитуды выходного сигнала к изменению напряженности поля. Попытки создать СШП рамочные антенны на базе электрически больших рамочных антенн путем введения распределенной резистивной нагрузки по пери-

метру рамки к успехам не привели, так как чувствительность таких антенн также оказалась слишком малой [6, 11].

Условия получения максимально достижимой чувствительности неискажающего приема СШП импульсных сигналов рамочными антеннами были исследованы в работе [7]. В частности, было изучено влияние электрических параметров и геометрических размеров рамки на чувствительность антенны и форму принимаемого сигнала. Показано, что при условии, когда периметр рамки не превышает половины пространственной длительности (произведения длительности на скорость света) фронта импульса возбуждающего антенну поля (электрически малая рамка) и когда постоянная времени цепи рамки значительно больше длительности импульса, такая рамочная антенна способна принимать импульсные сигналы практически без искажений. Однако замечено, что при таких размерах рамочная антенна обладает малой чувствительностью.

В данной работе для повышения чувствительности рамочной антенны предлагается использовать электрически большие рамки, т. е. увеличить площадь рамки, поскольку ЭДС на выходе рамочной антенны пропорциональна площади поверхности, ограниченной рамкой. Но при этом становится большим периметр рамки и возникает проблема с неискаженным приемом импульсных ЭМ-полей [6]. Она связана с возникновением искажающих послепульсных колебаний тока при превышении периметром рамки половины пространственной длительности фронта импульса. Для неискаженного приема импульсных ЭМ-полей необходимо:

а) выяснить причины возникновения послепульсных колебаний в электрически больших рамках;

б) найти способ избавиться от этих колебаний на входе приемного устройства.

Результаты соответствующих теоретических и экспериментальных исследований представлены в данной работе.

1. Причины возникновения послепульсных колебаний. Рассмотрим пространственно-временные зависимости распределения индуцированного тока по периметру круглой рамки с периметром, превышающим половину пространственной длительности фронта импульса возбуждающей ЭМ-волны. Для этого выполним компьютерное моделирование задачи преобразования падающей на рамку плоской СШП ЭМ-волны в индуцированный ток в рамке.

Постановка задачи. Пусть круглая рамка диаметром D сделана из металлического проводника круглого сечения диаметром d и расположена в свободном пространстве в плоскости XY так, что ее центр совпадает с началом координат (рис. 1). Нагрузкой антенны являются двенадцать активных сопротивлений R_n , моделирующих нагрузочные узлы. Они включены в разрывы проводника и расположены с интервалом $\varphi = 30^\circ$ по периметру рамки.

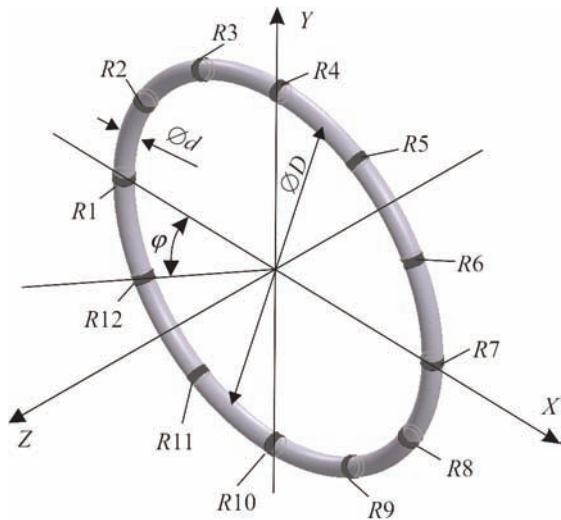


Рис. 1. Схема круглой рамочной антенны

Антенна возбуждается плоской ЭМ-волной, распространяющейся вдоль оси X . Вектор ее электрической компоненты \vec{E} направлен вдоль оси Y , а вектор магнитной компоненты \vec{H} – вдоль оси Z . Временные зависимости \vec{E} и \vec{H} имеют вид гауссовых импульсов, описываемых выражениями:

$$H(t) = H_0 \exp\left(-\left[\frac{t-t_z}{t_d}\right]^2\right); \quad (1)$$

$$E(t) = H(t) Z_0, \quad (2)$$

где t_z – время задержки импульса относительно начала временной оси; t_d – время спада импульса; H_0 – пиковое значение напряженности магнитного поля падающего импульса; Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства.

Необходимо найти и проанализировать пространственно-временные зависимости распределения индуцированного тока по периметру круглой рамки.

Метод решения. Расчет временных зависимостей токов, протекающих через сопротивления, будем производить с помощью численного моделирования *FDTD*-методом [14, 15] при помощи пакета программ *CST Microwave Studio* (<https://www.cst.com/products/cstmws>).

Для ограничения пространственной области расчета выберем «поглощающие» граничные условия *PML* (*Perfect Matching Layer*) [14, 16].

Моделирование. Выберем $t_d = 0,8$ нс, диаметр $D = 90$ мм, что удовлетворяет условию превышения периметром рамки пространственной длительности фронта импульса возбуждающего антенну поля, а диаметр проводника рамки $d = 2$ мм. Величины нагрузочных сопротивлений R_n возьмем такими, чтобы постоянная времени электрической цепи, определяющаяся индуктивностью проводника рамки и сопротивлением, равным сумме распределенных по рамке сопротивлений R_n , значительно превышала длительность возбуждающего импульса электромагнитного поля:

$$t_d \ll L / \sum_{n=1}^N R_n, \quad (3)$$

где L – индуктивность проводника рамки; n – порядковый номер сопротивления R ; N – общее количество сопротивлений.

При выполнении условия (3) амплитуда тока $i(t)$, протекающего через сопротивления, практически не зависит от их величины, а определяется величиной индуктивности [6]:

$$L_n \frac{di(t)}{dt} + i(t)R_n = U(t), \quad (4)$$

где L_n – индуктивность участка рамки, на котором находится сопротивление R_n ; $U(t)$ – ЭДС, наводимая электрическими и магнитными полями на участке рамки, на котором находится сопротивление R_n .

Выберем следующие параметры *FDTD*-моделирования:

- размеры расчетной области выбираются автоматически программой;
- минимальный шаг сетки – 0,2 мм;
- сеточная аппроксимация искривленных границ – *PBA* (*Perfect Boundary Approximation*).

Время наблюдения ограничим интервалом, в течение которого импульс индуцированного в рамке тока спадает до уровня 0,05 от максимальной амплитуды, но не более 10 нс.

Результаты моделирования. Рассчитанные временные зависимости тока, протекающего через сопротивления, приведены на рис. 2.

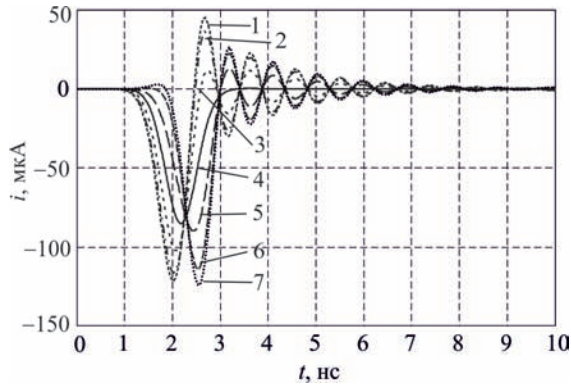


Рис. 2. Временные зависимости тока, протекающего через сопротивление R_n : кривая 1 – $R1$; кривая 2 – $R2, R12$; кривая 3 – $R3, R11$; кривая 4 – $R4, R10$; кривая 5 – $R5, R9$; кривая 6 – $R9, R8$; кривая 7 – $R7$

Как следует из графиков рис. 2, импульсы тока, протекающего через сопротивления $R4, R10$, расположенные на рамке под углами $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$, наиболее близки по форме к импульсам падающего поля. Это объясняется следующим образом. Ток в рамке возбуждается ЭДС, наводимыми электрическим и магнитным полями. Так как в областях, соответствующих $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$, вектор напряженности электрического поля нормален к проводнику рамки, то ЭДС, наводимая электрическим полем, равна нулю и ток в этой области определяется исключительно ЭДС, наводимой магнитным полем. В то же время в сопротивлениях, расположенных в разрывах проводника рамки, где вектор напряженности электрического поля имеет тангенциальную составляющую к проводнику рамки, наблюдаются искажения формы импульса тока с последующими осцилляциями. Максимальные искажения импульса тока наблюдаются в сопротивлениях $R1, R7$, расположенных под углами $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$, где вектор напряженности электрического поля имеет только тангенциальную составляющую к проводнику рамки. Таким образом, можно предположить, что искажения формы импульса тока создаются только токами, индуцированными электрическим полем.

2. Проверка достоверности вывода о природе искажений. Для проверки сделанного в предыдущем пункте вывода проведем дополнительные исследования на примере конструкции,

состоящей из двух взаимно ортогональных прямоугольных рамок.

Постановка задачи. Пусть приемная антенна состоит из двух одинаковых взаимно ортогональных прямоугольных рамок, расположенных в свободном пространстве. Рамки имеют размеры $D1 \times D2$, изготовлены из металлического профиля квадратного сечения толщиной d . Рамка 1 расположена в плоскости YZ , а рамка 2 – в плоскости XY . Центры рамок совпадают с началом координат (рис. 3).

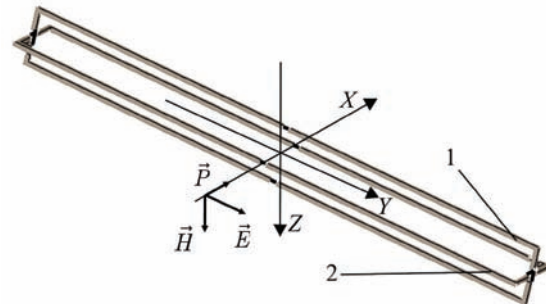


Рис. 3. Приемная рамочная антенна, состоящая из двух ортогональных прямоугольных рамок: 1 – рамка 1; 2 – рамка 2

Антенна возбуждается плоской ЭМ-волной, распространяющейся вдоль оси X . Вектор ее электрической компоненты \vec{E} направлен вдоль оси Y , а вектор магнитной компоненты \vec{H} – вдоль оси Z . Временные зависимости \vec{E} и \vec{H} имеют вид гауссовых импульсов, описываемых выражениями (1)–(2).

Необходимо найти и проанализировать временные зависимости индуцированных токов для каждой рамки на участках под углами в плоскости рамок $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ (рис. 4). Для этого разместим на этих участках в разрыв рамки сопротивления и будем анализировать ток, протекающий через них. Величины сопротивлений должны удовлетворять условию (3).

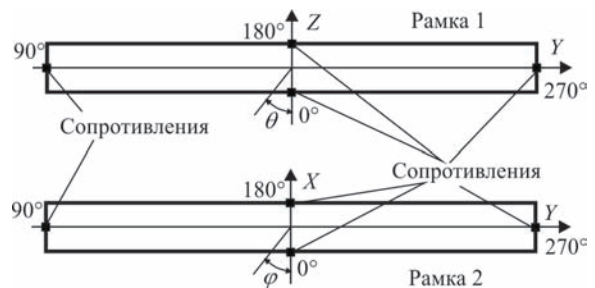


Рис. 4. Расположение сопротивлений на рамках

Моделирование. Как и в предыдущем случае, задачу будем решать *FDTD*-методом. Граничные условия и размер те же.

Рассмотрим прямоугольные идентичные рамки с размерами $D1 = 100$ мм и $D2 = 10$ мм из профиля толщиной $d = 2$ мм, что удовлетворяет условию превышения периметром рамки пространственной длительности фронта импульса возбуждающего антенну поля. Форма и длительность возбуждающего импульса аналогичны форме и длительности импульса, используемого в предыдущем моделировании. Время наблюдения ограничим интервалом 5 нс.

При расположении рамок, показанном на рис. 3, вектор напряженности \vec{E} электрического поля падающего электромагнитного импульса параллелен плоскости рамки 1 и плоскости рамки 2, а вектор напряженности падающего магнитного поля \vec{H} перпендикулярен плоскости рамки 2 и параллелен плоскости рамки 1. В этом случае ЭДС, наводимая электрической компонентой поля, будет присутствовать в обеих рамках, а ЭДС, наводимая магнитной компонентой, будет присутствовать только в рамке 2. Следовательно, в рамке 2 наводится ЭДС как электрической, так и магнитной компонентами ЭМ-поля, а в рамке 1 наводится ЭДС только от электрической компоненты. Вычитая из токов в рамке 2 токи в рамке 1, можно выделить ток, вызванный ЭДС, наводимой только магнитной компонентой ЭМ-поля.

Рассчитанные с использованием *FDTD*-метода временные зависимости тока, протекающего через сопротивления, для рамки, в которой присутствует ЭДС, наводимая только электрической компонентой поля, приведены на рис. 5, а для рамки, в которой присутствует ЭДС, наводимая как электрической, так и магнитной компонентами поля, – на рис. 6.

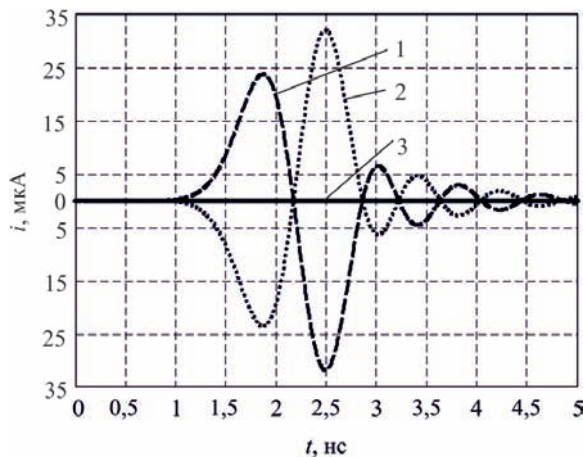


Рис. 5. Временные зависимости тока, протекающего через сопротивления, расположенные под различными углами θ , в рамке 1: кривая 1 – $\theta = 0^\circ$; кривая 2 – $\theta = 180^\circ$; кривая 3 – $\theta = 90^\circ$, $\theta = 270^\circ$

Как следует из временных зависимостей на рис. 5, токи, протекающие через сопротивле-

ния, расположенные в рамке 1, где ток индуцируется только электрической компонентой электромагнитного поля, под углами $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 270^\circ$, равны нулю. В тоже время импульсы тока (рис. 6) через сопротивления, расположенные в рамке 2 под углами $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$, где присутствует ЭДС от двух компонент ЭМ-поля, не равны нулю. Тогда, если токи в рамке 1 на этих участках равны нулю, то в рамке 2 токи на этих участках вызваны только ЭДС, наводимой магнитной компонентой ЭМ-поля. Эти токи полностью повторяют по форме падающий импульс ЭМ-поля.

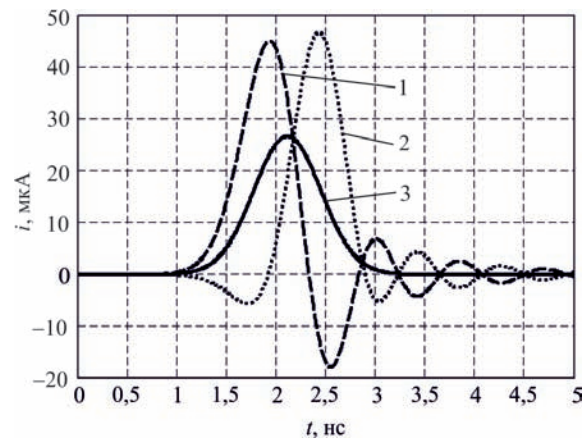


Рис. 6. Временные зависимости тока, протекающего через сопротивления, расположенные под различными углами φ , в рамке 2: кривая 1 – $\varphi = 0^\circ$; кривая 2 – $\varphi = 180^\circ$; кривая 3 – $\varphi = 90^\circ$, $\varphi = 270^\circ$

Импульсы тока, протекающего через сопротивления в рамке 1, расположенные под углами $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ (рис. 5), не равны нулю. Тогда, вычитая из временных зависимостей токов, протекающих через сопротивления в рамке 2, расположенные под углами $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$, временные зависимости токов, протекающих через сопротивления в рамке 1 под углами $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$, получим временные зависимости тока, протекающего через сопротивления в рамке 2, расположенные под углами $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$, и вызванного ЭДС, наводимой только магнитной составляющей ЭМ-поля. Временные зависимости разностей токов в рамках представлены на рис. 7.

Как можно заметить, временные зависимости разности токов близки по форме и амплитуде между собой, а также близки по форме к временной зависимости токов, протекающих через сопротивления, расположенные в рамке 2 под углами $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$ (рис. 6). Небольшие послеимпульсные колебания вызваны различием временных задержек импульсов токов, наведенных ЭДС электрической составляющей поля, в двух рамках.

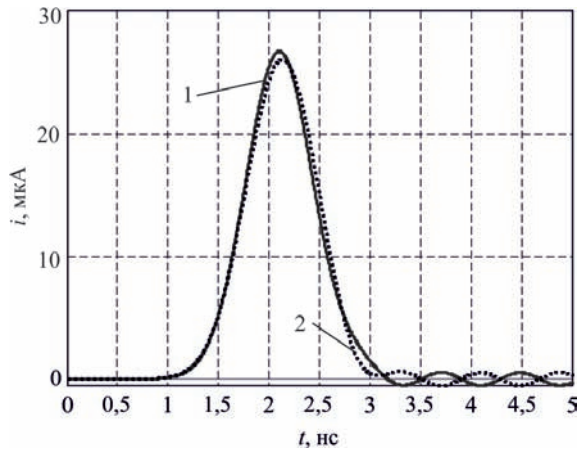


Рис. 7. Временные зависимости разности токов в двух рамках: кривая 1 – $\varphi = \theta = 0$; кривая 2 – $\varphi = \theta = 180^\circ$

Таким образом, искажения формы импульса, принятого рамочной антенной, у которой периметр рамки больше, чем половина пространственной длительности фронта возбуждающего импульса, определяется наличием тока, индуцированного электрической компонентой падающего электромагнитного поля. Импульс тока, индуцированный магнитной компонентой электромагнитного поля, совпадает по форме с импульсом падающего электромагнитного поля. Поэтому для неискаженного приема импульсного электромагнитного поля необходимо выделить из тока, индуцированного электрической и магнитной компонентами ЭМ-поля, ток, индуцированный только магнитной составляющей падающего ЭМ-поля.

3. Устранение нежелательных послепериодических колебаний на входе приемного устройства. Выделить из суммарного тока, индуцированного электрической и магнитной компонентами поля, только ток, индуцированный магнитной составляющей поля, можно, как было показано выше, используя две ортогональные рамки.

Однако существует и другой подход. Выделить ток, индуцированный магнитной составляющей ЭМ-поля, можно и при использовании одной круглой рамки. В работе [11] предложен способ выделения тока в электрически малой рамке, индуцированного как электрической, так и магнитной составляющими ЭМ-поля, из суммарного тока в рамке. При вычитании токов в нагрузочных сопротивлениях, расположенных на диаметрально противоположных участках рамки, выделяется ток, индуцированный электрической компонентой поля, а при суммировании этих токов выделяется ток, индуцированный магнитной составляющей поля.

Проверим такой способ выделения тока, индуцированного магнитной составляющей поля, для электрически большой рамки. Для этого вер-

немся к рис. 2, где представлены временные зависимости токов, протекающих через сопротивления, расположенные под различными углами φ . Проанализируем временные зависимости этих токов. Можно заметить, что для диаметрально расположенных сопротивлений, осцилляции токов противофазны. Принимая во внимание это обстоятельство и временные задержки максимумов импульсов тока относительно начала временной шкалы, просуммируем токи, протекающие через сопротивления, расположенные на диаметрально противоположных участках рамки. Результаты суммирования показаны на рис. 8.

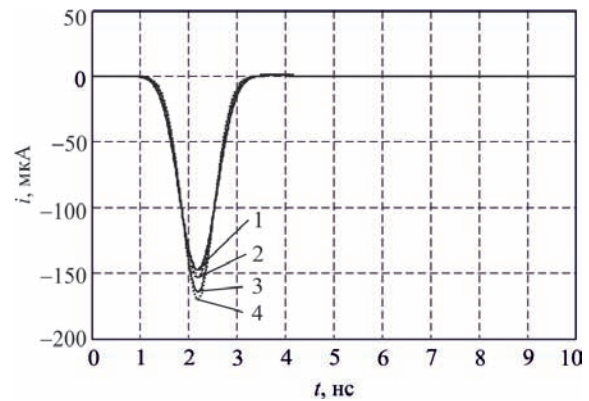


Рис. 8. Временные зависимости суммы токов, протекающих через сопротивления, расположенные на диаметрально противоположных участках рамки: кривая 1 – R1, R7; кривая 2 – (R2, R8), (R6, R12); кривая 3 – (R3, R9), (R5, R11); кривая 4 – R4, R10

Все временные диаграммы повторяют форму импульса падающего ЭМ-поля, но немного отличаются по амплитуде. Из этого следует, что при суммировании токов, протекающих через сопротивления, расположенные на диаметрально противоположных участках электрически большой рамки, токи, индуцированные магнитной составляющей ЭМ-поля, складываются, а токи, индуцированные электрической компонентой ЭМ-поля, взаимно вычитаются.

4. Экспериментальная проверка результатов моделирования. Измерения проводились на установке, блок-схема которой представлена рис. 9.

Основным элементом установки является *ТЕМ*-камера 3, представляющая собой отрезок однородной полосковой линии передачи длиной 450 мм при ширине полос 400 мм и расстоянии между ними 390 мм. Волновое сопротивление линии составляет 176 Ом. Возбуждение ее осуществляется через согласующую секцию в виде *ТЕМ*-рупора, а для согласования генератора импульсов с *ТЕМ*-камерой используется широкополосный трансформатор на длинных линиях (ШТЛ).

С целью устранения отражений от конца камеры и обеспечения возможности контроля прохождения через нее импульсного сигнала, полосковая линия нагружена на согласующую секцию в виде *TEM*-рупора, конструктивно аналогичного возбуждающей секции.

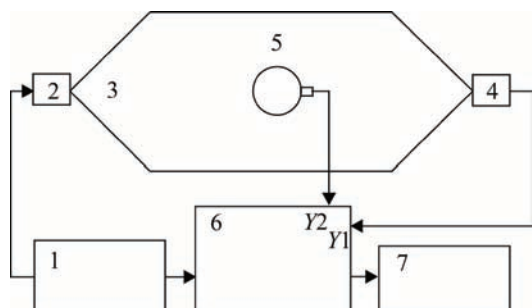


Рис. 9. Блок-схема установки для измерения характеристик приемной антенны: 1 – генератор импульсов Г5-78; 2 – ШТЛ 1:4; 3 – *TEM*-камера; 4 – ШТЛ 4:1; 5 – исследуемая антенна; 6 – стробоскопический осциллограф; 7 – компьютер

Формируемый генератором 1 импульсный сигнал с амплитудой 2 В, длительностью фронта и спада 0,8 нс и длительностью импульса 1,6 нс через согласующий симметрирующий ШТЛ 2 подается в *TEM*-камеру 3. Сигнал, прошедший *TEM*-камеру (рис. 10), через ШТЛ 4 поступает на согласованную нагрузку – вход Y1 осциллографа 6, где контролируются его амплитудно-временные параметры. Исследуемая приемная антенна 5 (рис. 11) помещается в центр *TEM*-камеры 3. Принятый антенной сигнал подается на вход Y2 осциллографа и регистрируется при помощи компьютера 7.

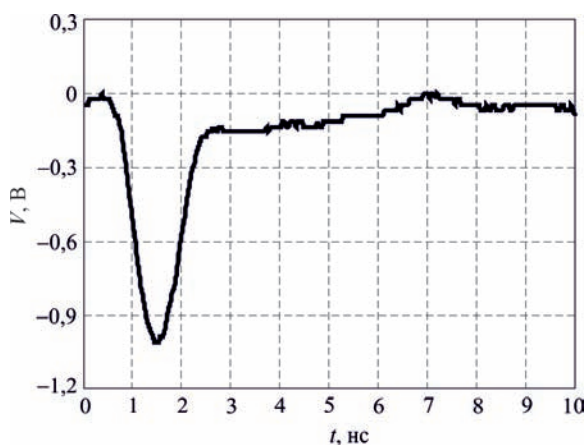


Рис. 10. Сигнал, прошедший *TEM*-камеру

В качестве нагрузки антенны с малым сопротивлением используется преобразователь «ток – напряжение» с полосой пропускания 800 МГц.

Так как при моделировании использовалась рамка с диаметром 90 мм, то ее собственная

резонансная частота $f = \frac{1}{\pi \cdot 0,09 \text{ с}} = 1,06 \text{ ГГц}$, и

при полосе пропускания преобразователя 800 МГц резонанс в антенне не наблюдается. Поэтому диаметр рамки увеличен до 160 мм. При этом резонанс должен наблюдаться на частоте $f = \frac{1}{\pi \cdot 0,18 \text{ с}} = 596 \text{ МГц}$, которая находится в полосе пропускания преобразователя.



Рис. 11. Исследуемая приемная антенна в центре *TEM*-камеры

На рис. 12 приведены результаты измерений временных зависимостей напряжения на выходе преобразователя «ток – напряжение» для случаев, когда нагрузка антенны находилась под углами $\varphi = 0^\circ$ (сопротивление $R1$, рис. 2) и $\varphi = 180^\circ$ (сопротивление $R7$, рис. 2). Суммарный сигнал, как видно, повторяет форму сигнала, прошедшего *TEM*-камеру (рис. 10).

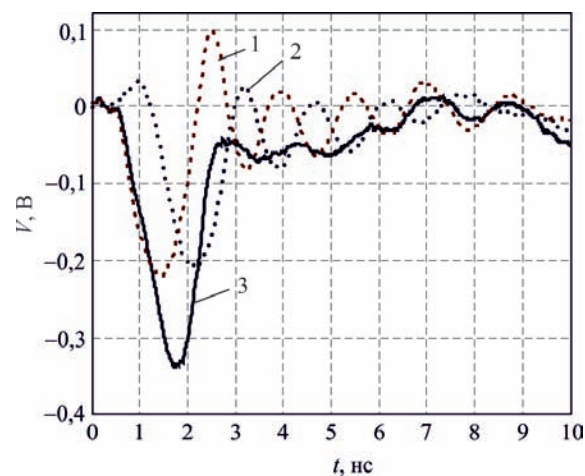


Рис. 12. Временные зависимости напряжения на выходе преобразователя «ток – напряжение»: кривая 1 – $\varphi = 0^\circ$; кривая 2 – $\varphi = 180^\circ$; кривая 3 – суммарный сигнал

Таким образом, путем суммирования сигналов, принимаемых в диаметрально противоположных участках круглой рамки, можно зарегистрировать сигнал без искажений формы электрически большой рамкой.

Выводы. В результате исследований установлено, что искажение формы импульса, принятого рамочной антенной, у которой периметр рамки больше, чем половина пространственной длительности фронта импульса падающего поля, обусловлено наличием тока, индуцированного электрической составляющей падающего импульсного ЭМ-поля.

Для неискаженного приема импульсного ЭМ-поля необходимо выделить из суммарного тока, индуцированного электрической и магнитной компонентами ЭМ-поля, ток, наведенный только магнитной составляющей ЭМ-поля. Это можно осуществить путем приема регистрируемого импульсного ЭМ-поля двумя ортогональными рамками с последующим взаимным вычитанием импульсов, принятых каждой из рамок, либо путем суммирования токов, индуцированных в диаметрально противоположных участках круглой рамки.

Библиографический список

- Герц Г. О лучах электрической силы. *Успехи физ. наук.* 1938. Т. 19, вып. 4. С. 559–570.
- Швец А. В., Кривонос А. П., Иванов В. К. Комплекс для многокомпонентных измерений СНЧ-ОНЧ электромагнитных полей. *Радиофизика и электроника.* 2016. Т. 7(21), № 4. С. 49–55.
- Meloling J. H., Meloling J. H., Rockway J. W., Daly M. P., Monges A. R., Allen J. C., Nielsen W. R., McGinnis P. M., Thompson R. B., Mozaffar N. A. A vector-sensing antenna system. *IEEE Antennas Propagat. Magazine.* 2016. Vol. 58, N 6. P. 57–63.
- Smith G. S. Loop antennas. *Antenna engineering handbook* 4th ed. J. L. Volakis, ed. McGraw-Hill Education, 2007. Chapter 5. P. 112–136.
- Harmuth H. F. *Antennas and waveguides for nonsinusoidal waves.* New York: Academic Press, 1984. 276 p.
- Огурцова Т. Н., Почанин Г. П., Холод П. В. Рамочная антенна для приема сверхширокополосных импульсных сигналов. *Радиофизика и электроника.* Сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2003. Т. 8, № 3. С. 429–437.
- Esselle K. P., Stuchly S. S. Resistively loaded loop as a pulse receiving antenna. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1990. Vol. 38, N 7. P. 1123–1126.
- Partridge R. E. Combined E and B sensor. Sensor and Simulation. Note 3. *Notes on EMP and related subjects.* Edited by C. E. Baum. Los Alamos Scientific Laboratory. 1964. 3 p.
- Theobald K. On the properties of loop antennas. Sensor and Simulation. Note 4. *Notes on EMP and related subjects.* Edited by C. E. Baum. Los Alamos Scientific Laboratory. 1964. 6 p.
- Baum C. E. Minimizing transit time effects in sensor cables. Sensor and Simulation Note 6. *Notes on EMP and related subjects.* Edited by C. E. Baum. Air Force Weapons Laboratory. 1964. 11 p.
- Kanda M. An electromagnetic near-field sensor for simultaneous electric and magnetic field measurement. *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.* 1984. Vol. EMC-26, N 3. P. 102–110.
- Kanda M. Standard probes for electromagnetic field measurements. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1993. Vol. 41, N 10. P. 1349–1364.
- Harmuth H. F., Ding-Rong S. Antennas for nonsinusoidal waves: II – Sensors. *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.* 1983. Vol. EMC-25, N 5. P. 107–115.
- Taflove A. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method.* New York: Artech House, 1995. 599 p.
- Taflove A., Hagness S. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method.* Boston: Artech House, 2000. 671 p.
- Berenger J. A perfectly matched layer for the absorptions of electromagnetic waves. *J. Computat. Phys.* 1994. Vol. 114, P. 185–200.

REFERENCES

- HERTZ, H., 1938. On the Rays of Electric Force. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* Vol. 19, Iss. 4, pp. 559–570 (in Russian).
- SHVETS, A., KRYVONOS, A., IVANOV, V., 2016. A complex for multicomponent measurements of ELF-VLF electromagnetic fields. *Radiophysics and Electronics.* Vol. 7(21), no. 4, pp. 49–55 (in Russian).
- MELOLING, J., MELOLING, J., ROCKWAY, J., DALY, M., MONGES A., ALLEN, J., NIELSEN, W., MCGINNIS, P., THOMPSON, R., MOZAFFAR, N., 2016. A vector-sensing antenna system. *IEEE Antennas Propagat. Magazine.* Vol. 58, no. 6, pp. 57–63.
- SMITH, G., 2007. Loop antennas. Chapter 5. In: J. L. VOLAKIS, ed. *Antenna engineering handbook*, 4th ed. McGraw-Hill Education, pp. 112–136.
- HARMUTH, H., 1984. *Antennas and waveguides for nonsinusoidal waves.* New York, Academic Press.
- OGURTSOVA, T., POCHANIN, G., KHOLOD, P., 2003. A Receiving Loop Antenna for Super-Broadband Pulsed Signals, *Telecommunications and Radio Engineering.* Vol. 60, Iss. 5&6. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v60.i56.70
- ESSELLE, K., STUCHLY, S., 1990. Resistively loaded loop as a pulse receiving antenna. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. 38, no. 7, pp. 1123–1126.
- PARTRIDGE, R. E., 1964. Combined E and B sensor. Sensor and Simulation. Note 3. In: C. E. BAUM, ed. *Notes on EMP and related subjects.* Los Alamos Scientific Laboratory.
- THEOBALD, K., 1964. On the properties of loop antennas. Sensor and Simulation. Note 4. In: C. E. BAUM, ed. *Notes on EMP and related subjects.* Los Alamos Scientific Laboratory.
- BAUM, C. E., 1964. Minimizing transit time effects in sensor cables. Sensor and Simulation. Note 6. In: C. E. BAUM, ed. *Notes on EMP and related subjects.* Air Force Weapons Laboratory.
- KANDA, M., 1984. An Electromagnetic Near-field Sensor for Simultaneous Electric and Magnetic Field Measurement. *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.* Vol. EMC-26, no. 3, pp. 102–110.
- KANDA, M., 1993. Standard probes for electromagnetic field measurements. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. 41, no. 10, pp. 1349–1364.
- HARMUTH, H., DING-RONG, S., 1983. Antennas for nonsinusoidal waves: II – Sensors. *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.* Vol. EMC-25, no. 5, pp. 107–115.
- TAFLOVE, A., 1995. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method.* New York, Artech House.
- TAFLOVE, A., HAGNESS, S., 2000. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method.* Boston, Artech House.
- BERENGER, J., 1994. A perfectly matched layer for the absorptions of electromagnetic waves. *J. Computat. Phys.* Vol. 114, pp. 185–200.

Рукопись поступила 24.04.2017.

P. V. Kholod, L. A. Varyanitsa-Roshchupkina,
T. N. Ogurtsova

ELECTRICALLY LARGE LOOP ANTENNA FOR RECEIVING UWB PULSED FIELDS

The causes of afterpulse current oscillations in electrically large loop antennas have been found basing on the analysis of results of simulation of the space-time current distribution induced by electric and magnetic field components in the circular and rectangular loops. It has been determined that the pulse shape distortion is due to the current induced by the electric component of the incident field. For undistorted reception, it is necessary to isolate only the current induced by the magnetic component from the total current. To do this, it is sufficient to sum the currents induced in diametrically opposite sections of the circular loop. It has been found experimentally that undistorted reception can be ensured by summing the signals recorded in diametrically opposite sections of the circular loop.

Key words: loop antenna, UWB antennas, EMF, space-time currents distributions.

П. В. Холод, Л. А. Варяница-Рощупкина,
Т. М. Огурцова

ЕЛЕКТРИЧНО ВЕЛИКА РАМКОВА АНТЕНА ДЛЯ ПРИЙМАННЯ НАДШИРОКОСМУГОВИХ ІМПУЛЬСНИХ ПОЛІВ

На основі аналізу результатів моделювання просторово-часових розподілів струмів, індукованих електричною і магнітною компонентами поля в круглій і прямокутній рамках, з'ясовані причини виникнення післяімпульсних коливань струмів у електрично великих рамкових антенах. Встановлено, що спотворення форми імпульсу обумовлене наявністю струму, індукованого електричною компонентою поля, яке падає на рамку. Для неспотвореного приймання необхідно виділяти з загального струму тільки струм, наведений магнітною компонентою. Для здійснення цього досить просумувати струми, індуковані в діаметрально протилежних ділянках круглої рамки. Експериментально підтверджено, що неспотворене приймання можна забезпечити шляхом сумування сигналів, що реєструються в діаметрально протилежних ділянках круглої рамки.

Ключові слова: рамкова антена, надширокосмугові антени, ЕРС, просторово-часовий розподіл струмів.