



УДК 621.317.42
ГРНТИ 47.45.29

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ РАМОЧНЫХ АНТЕНН МЕТОДОМ «ТРЕХ АНТЕНН»

М.В. НЕФЕДОВ

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (г. Мытищи)

К.С. ЧЕРНЯЕВ, кандидат технических наук

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (г. Мытищи)

Предложен метод «трех антенн» для определения коэффициентов калибровки магнитных рамочных антенн с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов. Рассмотрены особенности применения данного метода при определении коэффициентов калибровки активных и пассивных рамочных антенн. Приведено сравнение результатов измерений методом «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов с результатами выполненных с помощью различных полеобразующих систем, реализующих метод эталонного поля.

Ключевые слова: рамочная антенна, коэффициент калибровки, метод трех антенн, метод эталонного поля, напряженность магнитного поля, измерительный приемник, анализатор спектра, генератор сигналов.

FRAME H-FIELD ANTENNAS CALIBRATION COEFFICIENTS DETERMINATION BY THE «THREE ANTENNAS» METHOD

M.V. NEFEDOV

FSBI «MSMC» of the Ministry of defense of the Russian Federation (Mytishchi)

K.S. CHERNYAEV, Candidate of Technical sciences

FSBI «MSMC» of the Ministry of defense of the Russian Federation (Mytishchi)

The «Three antennas» method is proposed for determining the calibration coefficients of magnetic frame antennas using a measuring receiver (spectrum analyzer) and a signal generator. The features of using this method in determining the calibration coefficients of active and passive frame antennas are considered. The results of measurements using the «three antennas» method with the use of a measuring receiver (spectrum analyzer) and a signal generator are compared with the results of various field-forming systems that implement the reference field method.

Keywords: frame antenna, calibration coefficient, three-antenna method, reference field method, magnetic field strength, measuring receiver, spectrum analyzer, signal generator.

Введение. В настоящее время экранированные рамочные магнитные антенны широко применяются как при испытаниях на электромагнитную совместимость, измерении параметров электромагнитного поля для проведения исследований, так и при решении задач технической защиты информации.

Основными характеристиками этих антенн являются рабочий диапазон частот и коэффициент калибровки.

Коэффициент калибровки (КК) измерительной рамочной антенны определяется как отношение напряженности магнитного поля (НМП) в полеобразующей системе к значению напряжения на входе измерительного приемника, подключенного к выходу антенны



$$KK_n = \frac{H}{U_a}, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля, мкА/м; U_a – напряжение с выхода антенны, мкВ. Индекс « H » в левой части (1) обозначает, что KK измерительной рамочной антенны определяется по напряженности магнитного поля.

В общем случае, используют значение коэффициента калибровки, определенное относительно напряженности электрического поля, полученное путем прибавления к KK_n значения сопротивления свободного пространства, равного 51,5 дБ [1], при допущении о соотношении напряженностей электрического и магнитного полей $E/H=120\pi$.

В подавляющем большинстве случаев для определения характеристик рамочных антенн используют установки, реализующие один из основных методов определения коэффициентов калибровки рамочных магнитных антенн – метод эталонного поля.

Он заключается в генерации равномерного магнитного поля с известной напряженностью в определенной ограниченной области пространства – «рабочей зоне», измерении его величины с помощью исследуемой антенны и определении на основе соотношения (1) коэффициента калибровки исследуемой антенны.

При этом рамочные антенны работают, как правило, в дальней или промежуточной зоне. Сложность определения их характеристик состоит именно в том, что в лабораторных условиях чрезвычайно трудно обеспечить условия дальней зоны из-за больших значений рабочих длин волн. Поэтому используют уравнения для расчета напряженности магнитного поля в ближней зоне с усреднением этого поля по площади приемной антенны, что делает справедливым расчет характеристик, проведенный на основе измерений в ближней зоне для дальней зоны антенны. Основное уравнение, описывающее такое магнитное поле, имеет вид [2]:

$$H_{av} = \frac{IS_1}{2\pi R_0^3} \left\{ 1 + \frac{15(r_1 r_2)^2}{8R_0^4} + \frac{315(r_1 r_2)^4}{64R_0^8} + \dots \right\}, \quad (2)$$

где H_{av} – напряженность магнитного поля, усредненная по площади приемной антенны, А/м;

I – значение тока в излучающей рамочной антенне, А;

S_1 – площадь излучающей антенны, м²;

R_0 – расстояние между антеннами, м;

r_1 и r_2 – радиусы излучающей и приемной антенн, соответственно, м.

Актуальность. В зависимости от способа генерации магнитного поля на основе метода эталонного поля было создано несколько типов полеобразующих систем, предназначенных для воспроизведения и передачи единицы НМП [3, 4]:

- установки магнитного поля с эталонной излучающей антенной;
- установки на основе колец Гельмгольца;
- установки на основе ГТЕМ-ячейки;
- катушки индуктивности.

Частотные характеристики этих установок напрямую зависят от их геометрических размеров, поэтому диапазон измерений по частоте и размер измеряемых антенн в ряде случаев, например, в системах на основе колец Гельмгольца и ГТЕМ-ячеек, ограничивается допустимыми габаритными характеристиками полеобразующих систем. В то же время, динамический диапазон определяется, в основном, средой, в которой создается магнитное поле (внутри закрытого резонатора или в свободном пространстве), а также характеристиками генераторов, используемых в составе установки. Наряду с этим, для калибровки антенн на установках с эталонными излучающими антеннами, в которых напряженность магнитного поля рассчитывается по величине тока, протекающего через излучающую рамку, используются аналоговые элементы, например, термовакуумные преобразователи (ТВБ). А для контроля тока,



протекающего в полеобразующей системе, используются устаревшие измерители термо-ЭДС. В более поздних образцах установок вместо ТВБ используются дифференциальные усилители, служащие источником нелинейных искажений при определении величины напряженности магнитного поля, создаваемого излучающей антенной. Эти элементы вносят дополнительную погрешность в результаты измерений, увеличивают стоимость, а также усложняют обслуживание и эксплуатацию этих установок.

Описание и анализ особенностей практической реализации метода «трех антенн». В то же время, за последние несколько лет за рубежом всё большее распространение при определении характеристик рамочных магнитных антенн, получает метод «трех антенн» [5–7], известный как один из наиболее популярных методов при определении величины коэффициента усиления рупорных антенн, работающих в СВЧ-диапазоне. В отечественной практике радиоизмерений данный метод для определения характеристик рамочных антенн ранее не применялся.

Суть метода трех антенн, применительно к рамочным антеннам, заключается в проведении серии из трех попарных измерений между двумя антеннами, одна из которых является передающей (излучающей), а другая приемной. При этом магнитное поле, создаваемое излучающей антенной в плоскости приемной антенны, в соответствии с (2), может быть достаточно точно выражено в терминах падающих и отраженных волн, позволяющих представить рассматриваемую систему как четырехполюсник, описываемый системой S-параметров [8, 9]. Тогда, проведя серию из трех попарных измерений с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ), на основе полученных трех уравнений связи между антеннами: 1-2, 1-3, 2-3, можно найти комплексные коэффициенты калибровки каждой из трех рамочных антенн:

$$\begin{aligned} KK_1(\omega) &= \sqrt{\left| \frac{-A_{23}a_{12}a_{13}}{A_{12}A_{13}a_{23}} \right|} \\ KK_2(\omega) &= \sqrt{\left| \frac{-A_{13}a_{12}a_{23}}{A_{12}A_{23}a_{13}} \right|}, \\ KK_3(\omega) &= \sqrt{\left| \frac{-A_{12}a_{13}a_{23}}{A_{13}A_{23}a_{12}} \right|} \end{aligned} \quad (3)$$

$$a_{lm} = \frac{\sqrt{1+k^2 R_{lm}^2}}{j\omega\mu_0\pi Z R_{lm}^3} \left\{ 1 + \frac{15(r_l r_m)^2}{8R_{lm}^4} + \frac{315(r_l r_m)^4}{64R_{lm}^8} \right\}, \quad (4)$$

$$R_{lm} = \sqrt{R_{0lm}^2 + r_l^2 + r_m^2}, \quad (5)$$

где $(l,m)=(1,2),(1,3),(2,3)$;

A_{12}, A_{13}, A_{23} – измеренные с помощью ВАЦ комплексные S-параметры;

a_{12}, a_{13}, a_{23} – приведенные к комплексному виду коэффициенты, описывающие магнитное поле излучающей антенны, усредненное по площади приемной рамки;

k – волновое число;

ω – угловая частота, рад/с;

μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м;

Z – нагрузка измерительной линии, Ом;

r_1, r_2, r_3 – радиусы рамок, м;

$R_{012}, R_{013}, R_{023}$ – расстояние между антеннами, м.



Представление системы из двух антенн с помощью S-параметров позволило включить в исходное уравнение (2) величину напряжения с выхода приемной антенны. Благодаря этому появилась возможность использовать порт ВАЦ, вместо отдельной измерительной линии для определения величины тока в излучающей антенне.

Недостатком такого подхода является существенное уменьшение частотного диапазона измерений, поскольку нижняя граница работы большинства ВАЦ начинается, как правило, с десятков кГц или МГц. Увеличение частотного диапазона по нижней границе производится с помощью специальных программных и аппаратных опций, что увеличивает стоимость средства измерений и усложняет процесс измерений. Проблемным вопросом использования ВАЦ является сравнительно небольшой динамический диапазон на нижних частотах, поэтому определение больших значений коэффициентов калибровки рамочных антенн, применяемых для измерения магнитных полей величиной в десятки А/м, представляет собой крайне трудную задачу.

Таким образом, существует необходимость адаптации исходного метода к применению в области частот от 9 кГц и ниже и расширению динамического диапазона определения КК магнитных антенн.

Для этого необходимо перейти от измерения комплексных S-параметров к измерениям амплитудно-частотных характеристик антенн.

Исходя из [10], параметры A_{12} , A_{13} , A_{23} в уравнении (3) представляют собой отношение

$$|S_{21}| = \frac{U}{\sqrt{P_{in}}},$$

где U – напряжение с выхода приемной антенны, измеренное на входе приемника, В;
 P_{in} – мощность, излученная передающей антенной (падающая мощность), Вт.

В соответствии с [11], параметр S_{21} можно представить в виде

$$|S_{21}| = \frac{U_{Ri}}{U_{Fi}}, \quad (6)$$

где U_{Ri} – напряжение отраженной волны (напряжение на входе приемной антенны), В;

$U_{Fi} = \frac{U_s}{2} \Big|_{z_0=z_s}$ – напряжение падающей волны, В;

U_s – напряжение источника (напряжение с выхода измерительного генератора), В.

Таким образом, подставляя (6) в (3) и переходя от комплексной величины, из (3)–(5) получаем:

$$KK_i = \sqrt{\frac{U_{jn}U_s a_{ij}a_{in}}{2U_{ij}U_{in}a_{jn}}}, \quad (7)$$

$$a_{lm} = \frac{\sqrt{1+k^2 R_{lm}^2}}{2\pi f \mu_0 Z R_{lm}^3} \left\{ 1 + \frac{15(r_l r_m)^2}{8R_{lm}^4} + \frac{315(r_l r_m)^4}{64R_{lm}^8} \right\}, \quad (8)$$

где $(i, j, n) = (1, 2, 3), (2, 1, 3), (3, 1, 2)$;

U_{jn} , U_{in} , U_{ij} – напряжение с выхода приемной антенны, В;

f – частота измерений, Гц.

Определение характеристик рамочных антенн с помощью уравнений (7)–(8) может быть реализовано в частотном диапазоне от 10 Гц до 30 МГц и диапазоне КК не менее 120 дБ (1/м). В качестве средств измерений могут быть использованы измерительный приемник (анализатор



спектра) и генератор сигналов. Измерения при этом проводятся в дискретных частотных точках, количество которых определяется типом исследуемой антенны.

Поскольку метод «трех антенн» изначально был разработан и реализован в СВЧ-диапазоне для определения характеристик рупорных антенн, его базовым ограничением является использование идентичных пассивных антенн. Однако метод «трех антенн» позволяет проводить измерение не только пассивных, но и активных антенн. Порядок проведения измерений (1-2, 1-3, 2-3) – где в начале обозначается приемная антенна, а затем излучающая, подразумевает, что антенна № 1 всегда будет являться приемной, поэтому именно она может быть активной. Наряду с этим, анализ результатов и алгоритма измерений методом «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов выявил следующие важные особенности:

1) Необходимость учета потерь в измерительной линии между генератором и излучающей антенной. Величина U_s в уравнении (7) принимается как напряжение с выхода измерительного генератора в отсутствии потерь в измерительном кабеле. Однако, в зависимости от типа и длины кабеля, потери в кабеле могут составлять от 0,01 до 1 дБ и более в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц. Для учета этих потерь необходимо проводить калибровку кабеля в тех же частотных точках, что и при измерении параметров антенны, а затем учитывать в уравнении (8) как:

$$U'_s = U_s - U_l,$$

где U'_s – значение напряжения на входе передающей антенны, В;
 U_l – потери в измерительном кабеле, В.

2) Искажения за счет переотражений от входа приемника или анализатора спектра. Из-за неидеального согласования тракта «приемная антенна» – «кабель» – «вход приемника», результирующая величина напряжения с выхода приемной антенны включает в себя искажения от входа приемника или анализатора. Для подавления этого эффекта в схеме измерения принято использовать внешний аттенюатор с ослаблением в 5-10 дБ. Однако использование ослабления больше 5 дБ может подавить полезный сигнал в диапазоне частот до 100 Гц, поскольку в этом диапазоне КК антенн достигает величин в 100 дБ (1/м) и более, а отношение сигнал/шум составляет лишь единицы дБ. Поэтому необходимо использовать перестраиваемый аттенюатор измерительного приемника (анализатора спектра), который управляется программными средствами самого измерительного прибора. Этот аттенюатор обладает большим диапазоном ослабления и при этом позволяет корректно оценивать величину сигнала с выхода приемной антенны во всем диапазоне частот.

3) Выбор расстояния между антеннами. В основополагающих публикациях по реализации метода «трех антенн» для рамочных антенн выбор расстояния между антеннами практически никак не рассматривается. Кроме того, в действующих нормативных документах, регламентирующих процесс калибровки рамочных антенн методом образцового поля, не дается рекомендаций по этому поводу [1]. Между тем, исследования показывают [12], что выбор расстояния между антеннами является одним из наиболее критичных вопросов в процессе определения характеристик антенн с помощью методов, базирующихся на уравнении (2), особенно для частот свыше 5 МГц. На расстояниях между антеннами равных 1-2 радиусам приемной антенны и меньше, на результаты измерений влияют их линейные размеры, а на больших расстояниях – уменьшение величины магнитного поля и появление неравномерностей его распределения вследствие уменьшения индукционной связи между антеннами. В зарубежных источниках указано, что расстояние между антеннами должно быть не менее величины четырех радиусов большей из антенн [13]. В отечественных документах [14] это расстояние определяется как



$$\frac{A_2}{0,28} < L < \frac{A_2}{0,23},$$

где A_2 – радиус поверяемой (приемной) антенны, м;
 L – расстояние между антеннами, м.

При этом исследования и практика измерений показывают, что наиболее корректным будет являться расстояние, выбранное из условия

$$4A < L < \frac{A}{0,23}, \quad (9)$$

где A – радиус большей антенны, м.

Поскольку активная антенна содержит усилитель, то взаимное влияние антенн друг на друга при выборе расстояния на основе нижнего порога из (9) будет выражено гораздо сильнее, чем при определении характеристик пассивных антенн. При этом большинство современных активных антенн не оснащено индикатором насыщения, поэтому при подаче с генератора напряжения U_s антенна может оказаться в режиме перенасыщения, что может привести к значительной погрешности измерений [15]. Поэтому критерий (9) в случае использования активной антенны в качестве приемной должен выглядеть как

$$7A < L < \frac{A}{0,12}.$$

Выполнение данного условия позволяет снизить составляющую погрешности, вызванную некорректным выбором расстояния, до 1 % и менее во всем частотном диапазоне.

Результаты измерений с применением метода «трех антенн» Для проверки работоспособности метода «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов были проведены сравнительные измерения коэффициентов калибровки рамочных пассивных антенн ЕМСО 6511, «Сектор» и активной рамочной антенны АМА-30 методом «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов, с помощью колец Гельмгольца («Сектор», АМА-30), методом эталонного поля (ЕМСО 6511, «Сектор») и с помощью установки на основе ГТЕМ – камеры (АМА-30). Измерения проводились в диапазоне частот от 20 Гц до 5 МГц для антенны ЕМСО 6511, от 1 кГц до 30 МГц для антенны «Сектор» и от 9 кГц до 30 МГц для АМА-30.

На рисунках 1–3 показана разница определения КК между методом «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов, и другими методами для каждой из антенн.

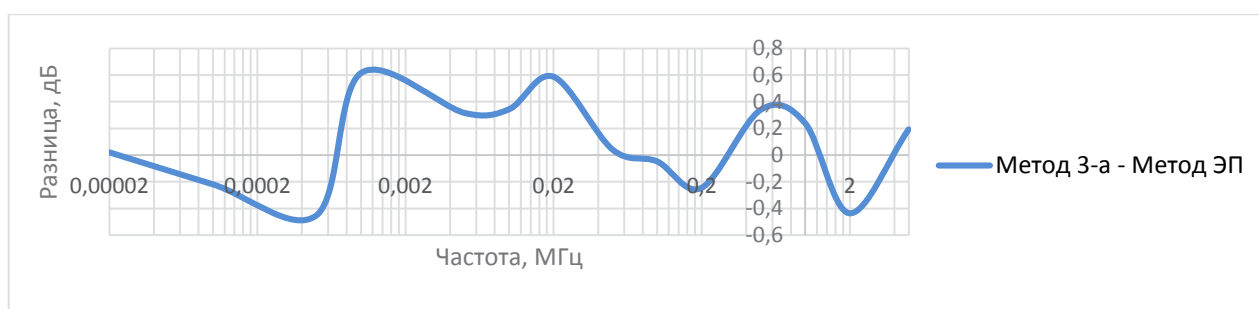


Рисунок 1 – Разница результатов определения коэффициентов калибровки для антенны ЕМСО 6511

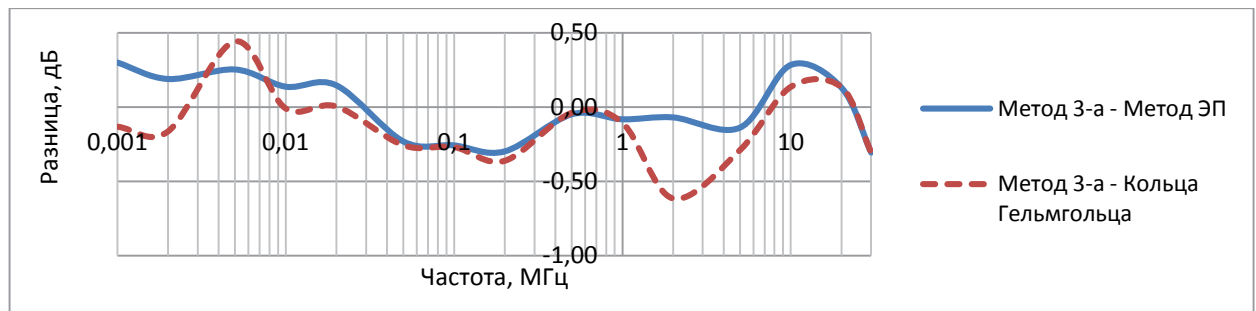


Рисунок 2 – Разница результатов определения коэффициентов калибровки КК для антенны «Сектор»

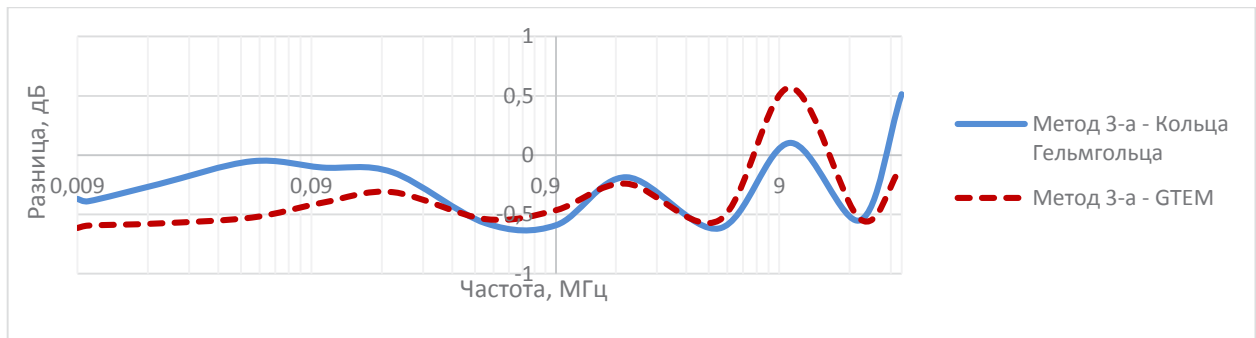


Рисунок 3 – Разница результатов определения коэффициентов калибровки для антенны АМА-30

Как следует из графиков, наибольшая разница результатов измерений для всех исследуемых антенн составила 0,62 дБ. Таким образом, результаты определения КК различных типов антенн методом «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов хорошо согласуются с результатами измерений с помощью рабочих эталонов единицы напряженности магнитного поля, реализующих метод эталонного поля в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц.

Выводы. Представленный метод «трех антенн» с применением измерительного приемника (анализатора спектра) и генератора сигналов позволяет расширить частотный и динамический диапазоны определения характеристик антенн и снять ограничения, возникающие при использовании ВАЦ в исходном методе. При этом метод позволяет определять КК рамочных магнитных антенн в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц с требуемой точностью. Одновременно упрощается конструкция полеобразующей системы, а в качестве измерительных приборов могут использоваться распространенные и доступные средства измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех.
- Greene F.M. The Near-Zone Magnetic Field of a Small Circular-Loop Antenna. JOURNAL OF RESEARCH of National of Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation, October-December 1967, vol. 71C, no. 4. P. 319–326.
- Бузинов В.С. Установка для поверки рамочных ИНП по образцовому полю индукции/ Измерительная техника.1961. № 6. С. 46–48.
- Бузинов В.С., Васенков Л.В., Токатлы В.И. Источники образцового магнитного поля на базе четырехпроводной линии / Измерительная техника.1990. № 5. С. 51–52.



5. Sen O., Cakir S. Loop Antenna Calibrations with Inclusion of Vector Network Analyser and Comparison Between Calibration Methods. EMC Europe. 2017, 5 p. DOI: 10.1109/EMCEurope.2017.8094694.
6. Supplementary comparison: APMP.EM.RF-S21.F/ Loop antennas (9 kHz to 30 MHz), Final Report, 2018.
7. Ishii M., Fujii K. Loop Antenna Calibration Methods in Low-frequency. EMC'14, Tokyo, 2014, pp. 290–293.
8. Ishii M., Komiyama K. A Measurement Method for Magnetic Antenna Factor of Small Circular Loop Antenna by 3-Antenna Method. URSI. North American Radio Science Meeting (Columbus), July 2003, pp. 458-464. DOI: 10.1109/CPM.2004.305450.
9. Iwasaki T., Takashima M. Measurement of magnetic complex antenna factor of a double-loaded shielded loop antenna by 3-antenna methods, 11 th -IMEKO TC-4 Symp. - Trends in Electrical Measurement and Instrumentation, September 13-14, 2001, P. 281–284.
10. Fujii K., Sakai K., Sugiyama T., Sebata K., Nishiyama I. Calibration of Loop Antennas for EMI Measurements in the Frequency Range Below 30 MHz. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology 63 (1), 2016, P. 71–81.
11. Дансмор Д. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: Техносфера, 2018. С. 25–28.
12. Schwarzbeck D. Measurements of magnetic and electric field strengths in distances of up to 10 m around transmit loop antennas in the frequency range 9 kHz to 30 MHz. Schwarzbeck, 2014, p. 8.
13. Taggart H.E., Workman J.L. Technical Note 370 Calibration Principles and Procedures for Field Strength Meters (30 Hz to 1 GHz). United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1969, p. 65.
14. ГОСТ 8.363-79. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Антенны измерительные рамочные. Методы и средства поверки.
15. Kriz A. Saturation of Active Loop Antennas. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC 2016, p. 4. DOI: 10.1109/IEMC.2016.7571731.

REFERENCES

1. GOST CISPR 16-1-4-2013 Sovmestimost' tehniceskikh sredstv `elektromagnitnaya. Trebovaniya k apparature dlya izmereniya parametrov industrial'nyh radiopomeh i pomehoustojchivosti i metody izmerenij. Chast' 1-4. Apparatura dlya izmereniya radiopomeh i pomehoustojchivosti. Antenny i ispytatel'nye ploschadki dlya izmereniya izluchaemyh pomeh.
2. Greene F.M. The Near-Zone Magnetic Field of a Small Circular-Loop Antenna. JOURNAL OF RESEARCH of National of Bureau of Standards - C. Engineering and Instrumentation, October-December 1967, vol. 71C, no. 4. pp. 319–326.
3. Buzinov V.S. Ustanovka dlya poverki ramochnyh INP po obrazcovomu polyu indukcii/ Izmeritel'naya tehnika. 1961. № 6. pp. 46–48.
4. Buzinov V.S., Vasenkov L.V., Tokatly V.I. Istochniki obrazcovogo magnitnogo polya na baze chetyrehprovodnoj linii / Izmeritel'naya tehnika. 1990. № 5. pp. 51–52.
5. Sen O., Cakir S. Loop Antenna Calibrations with Inclusion of Vector Network Analyser and Comparison Between Calibration Methods. EMC Europe. 2017, 5 p. DOI: 10.1109/EMCEurope.2017.8094694.
6. Supplementary comparison: APMP.EM.RF-S21.F/ Loop antennas (9 kHz to 30 MHz), Final Report, 2018.
7. Ishii M., Fujii K. Loop Antenna Calibration Methods in Low-frequency. EMC'14, Tokyo, 2014, pp. 290–293.
8. Ishii M., Komiyama K. A Measurement Method for Magnetic Antenna Factor of Small Circular Loop Antenna by 3-Antenna Method. URSI. North American Radio Science Meeting (Columbus), July 2003, pp. 458-464. DOI: 10.1109/CPM.2004.305450.



9. Iwasaki T., Takashima M. Measurement of magnetic complex antenna factor of a double-loaded shielded loop antenna by 3-antenna methods, 11 th -IMEKO TC-4 Symp. - Trends in Electrical Measurement and Instrumentation, September 13-14, 2001, pp. 281–284.
10. Fujii K., Sakai K., Sugiyama T., Sebata K., Nishiyama I. Calibration of Loop Antennas for EMI Measurements in the Frequency Range Below 30 MHz. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology 63 (1), 2016, pp. 71–81.
11. Dansmor D. Nastol'naya kniga inzhenera. Izmereniya parametrov SVCh-ustrojstv s ispol'zovaniem peredovyh metodik vektornogo analiza cepej. M.:Tehnosfera, 2018. pp. 25–28.
12. Schwarzbeck D. Measurements of magnetic and electric field strengths in distances of up to 10 m around transmit loop antennas in the frequency range 9 kHz to 30 MHz. Schwarzbeck, 2014, p. 8.
13. Taggart H.E., Workman J.L. Technical Note 370 Calibration Principles and Procedures for Field Strength Meters (30 Hz to 1 GHz). United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1969, p. 65.
14. GOST 8.363-79. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Antenny izmeritel'nye ramochnye. Metody i sredstva poverki.
15. Kriz A. Saturation of Active Loop Antennas. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC 2016, p. 4. DOI: 10.1109/ISEMC.2016.7571731.

© Нефедов М.В., Черняев К.С., 2020

Нефедов Михаил Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории научно-исследовательского (испытательного) отдела, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Минобороны России, Россия, 141006, г. Мытищи, ул. Комарова, 13, ktnefed@gmail.com.

Черняев Константин Сергеевич, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского (испытательного) отдела, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Минобороны России, Россия, 141006, г. Мытищи, ул. Комарова, 13, 120pi@rambler.ru.