

О.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВІДТВОРЕННЯ ОДИНИЦІ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В GTEM-КАМЕРІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

У роботі представлено опис еталона одиниці напруженості електромагнітного поля в діапазоні частот 10 кГц - 1 ГГц. Еталон складається з GTEM-камери, генератора, підсилювача, засобів вимірювальної техніки, спеціалізованого програмного забезпечення поставлених компанією Роде і Шварц (Німеччина). Наведено результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик вузлів, критичних для величини невизначеності відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля. Розроблено співвідношення для розрахунку невизначеності еталонної установки напруженості електромагнітного поля. Проведено визначення метрологічних характеристик вузлів еталонної установки для відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля. Наведені результати експериментальних досліджень з мінімізації невизначеності за рахунок складової хвилевого опору GTEM-камери, що будуть використані при калібруванні еталонної установки. Дана стаття є другою частиною узагальнених результатів досліджень.

Ключові слова: еталон одиниці, напруженість електромагнітного поля, радіочастотний діапазон, метрологічні характеристики, невизначеність.

Е.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В GTEM-КАМЕРЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В работе представлено описание эталона единицы напряженности электромагнитного поля в диапазоне частот 10 кГц - 1 ГГц. Эталон состоит из GTEM-камеры, генератора, усилителя, средств измерительной техники, специализированного программного обеспечения поставленных компанией Роде и Шварц (Германия). Приведены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик узлов, критичных для величины неопределенности воспроизведения единицы напряженности электромагнитного поля. Разработан соотношение для расчета неопределенности эталонной установки напряженности электромагнитного поля. Проведено определение метрологических характеристик узлов эталонной установки для воспроизведения единицы напряженности электромагнитного поля. Приведенные результаты экспериментальных исследований по минимизации неопределенности за счет составляющей волнового сопротивления GTEM-камеры, которые будут использованы при калибровке эталонной установки. Данная статья является второй частью обобщенных результатов исследований.

Ключевые слова: эталон единицы, напряженность электромагнитного поля, радиочастотный диапазон, метрологические характеристики, неопределенность.

О.М. VASILYEVA, O.V.MAKAROV

INVESTIGATION OF THE UNCERTAINTY OF THE REPRODUCTION OF A UNIT OF ELECTROMAGNETIC FIELD STRENGTH IN A GTEM CAMERA FOR CONDUCTING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTS

The paper describes the reference of the unit of intensity of the electromagnetic field in the frequency range of 10 kHz - 1 GHz. The standard consists of a GTEM camera, generator, amplifier, measuring equipment, specialized software supplied by Rode and Schwartz (Germany). The results of experimental studies of the metrological characteristics of nodes critical for the magnitude of the uncertainty of the reproduction of a unit of electromagnetic field intensity are presented. A relation is developed to calculate the uncertainty of the reference setting of the electromagnetic field strength. The determination of the metrological characteristics of the units of the standard installation for the reproduction of the unit of electromagnetic field intensity. The results of experimental studies on minimizing uncertainty due to the component wave resistance of the GTEM camera, which will be used in the calibration of the reference installation, are presented. This article is the second part of the generalized research findings.

Keywords: unit standard, electromagnetic field strength, radio frequency range, metrological characteristics, uncertainty.

Проблеми метрологічного забезпечення радіоелектронних систем і підвищення достовірності вимірювань в області надвисоких частот радіохвиль визначають необхідність подальшого розвитку системи метрологічного забезпечення вимірювань в діапазоні НВЧ. Особливе значення створення еталонної установки відтворення одиниці напруженості електромагніт-

ного поля має для антенних вимірювань, метрологічне забезпечення яких в Україні майже відсутнє і потребує подальшого розвитку.

Структурна схема установки відтворення напруженості електромагнітного поля в GTEM-камері наведена на рис.1. Невизначеність цього відтворення складається з невизначеностей, пов'язаних з вимірюванням

радіочастотної потужності, визначення характеристичного імпедансу ГТЕМ-камери, відстані між центральним провідником і заземленою площиною, орієнтацією і розташуванням зонда. Неузгодженості збільшують невизначеність вимірювання переданої потужності.

Відтворене електромагнітне поле (ЕМП) обчислюється за формулою

$$E = \frac{\sqrt{P \cdot Z_0}}{h}, \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля;

P – потужність, що подається до входу ГТЕМ-камери;

Z – хвильовий імпеданс ГТЕМ-камери;

h – висота перерізу робочої зони.

Відносну сумарну невизначеність напруженості E можна оцінити за формулою:

$$\frac{u_c(E)}{E} = \sqrt{\left(\frac{u(E)}{2P}\right)^2 + \left(\frac{u(Z)}{2Z}\right)^2 + \left(\frac{u(k_f)}{2k_f}\right)^2 + \left(\frac{u(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u(on)}{on}\right)^2}, \quad (2)$$

де $u(k_f)$ – невизначеність визначення коефіцієнта корекції k_f на розподіл стоячої хвилі;

$u(on)$ – невизначеність, пов'язана з неточним визначенням положення on та орієнтації об'єкта (зонда) у ГТЕМ-камери;

$u(P)$ – невизначеність визначення потужності P , що подається до входу ГТЕМ-камери;

$u(Z)$ – невизначеність визначення хвильового імпедансу ЗГТЕМ-камери;

$u(h)$ – невизначеність визначення висоти h перерізу робочої зони.

Бюджет невизначеності для калібрування в ГТЕМ-камері, наведений в [1], представлено у табл. 1.

Як випливає з табл. 1, основний внесок у невизначеність вносить вимірювання потужності, а також визначення хвильового опору камери.

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності для калібрування в ГТЕМ- камері

Внесок	Похибка	Розподіл ймовірності	Ваговий коефіцієнт	Стандартне відхилення
Вимірювач потужності	6,2 %	Прямокутний	0,5	3,6%
Неузгодженість 1	0,9 %	U-образний	0,5	0,7%
Неузгодженість 2	0,9 %	U-образний	0,5	0,7%
Загасання атенуаторів	3,5 %	Прямокутний	0,5	2,1%
Характеристичний імпеданс		Прямокутний	0,5	1,2%
Корекція розподілу стоячої хвилі	2 %	Прямокутний	0,5	1,2%
Відстань розділу		Прямокутний	1	0,3%
Орієнтація та позиціонування зонду	1 %	Прямокутний	1	0,6%
Сумарний				2,4%

Оцінка невизначеності, що внесена характеристичним опором ГТЕМ – камери

Існує два способи перевірки 50 Ом-го характеристичного імпедансу моделі ГТЕМ. Одним з них є використання аналітичних формул [2–6] для отримання імпедансу з відомих геометрій. Інший [7–16] – це збудження однократним одиночним імпульсом у вхідному порті моделі ГТЕМ і спостереження поширення імпульсів по лінії передачі. Результат аналітичного підходу є наближеним і дає результати, які не обов'язково відображають реальну поведінку моделі ГТЕМ. Другий метод є кращим, оскільки він безпосередньо пов'язаний з модельованою структурою. При моделюванні трапецієподібні імпульси напругою 1 В подають до вхідного порту моделі ГТЕМ. Час зростання імпульсу – 1 нс, тривалість вершини – 10 нс, час спадання 1 нс, шпаруватість імпульсів – 1 мкс. Ці імпульси напруги показані на рис. 1. Отримані імпульси величиною 0,5 В вказують, що опір камери був близьким до опору джерела.

Напруга між перегородкою і підлогою була змодельована в місцях уздовж довжини перегородки, щоб дослідити амплітуду трапецієподібного сигналу, коли він рухається по перегородці до кінцевого резистора. Поширення імпульсів від ближнього кінця до далекого кінця у часовій області показано на рис. 1. Модель ГТЕМ відповідала всім критеріям, оскільки: напруга 0,5 В поширювалася уздовж перегородки від

ближнього кінця до далекого кінця, з чого можна заключити, що імпеданс моделі ГТЕМ узгоджений з джерелом і лінією передачі. По-друге, фіксується лише незначний відбитий імпульс. Інформація про напругу, отриману при моделюванні, показує, що опір лінії передачі в моделі ГТЕМ очікується приблизно на рівні 50 Ом.

Розробник ГТЕМ-камери фірма TESEQ, що використана для створення еталона в діапазоні частот 10 кГц – 1 ГГц, надає наведені нижче характеристики імпедансу камери (рис. 2).

Наведений імпеданс близький до 50 Ом, але використання цих значень в розрахунку невизначеності відтворення напруженості електромагнітного поля без належного експериментального підтвердження неможливе.

Хвильовий опір ГТЕМ камери здебільшого залежить від її геометричних розмірів (співвідношення висоти та ширини перегородки). Внаслідок недотримання співвідношення між висотою та шириною перегородки камери за рахунок технології виготовлення та неточного збирання камери величина хвильового опору має різні значення вздовж камери. Тому для зменшення невизначеності відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля в камері ГТЕМ, яка викликана відхилення хвильового опору камери від значення 50 Ом, необхідно провести дослідження розподілу хвильового опору вздовж камери ГТЕМ та визна-

чити ділянки камери, де значення хвильового опору має незначну нерівномірність.

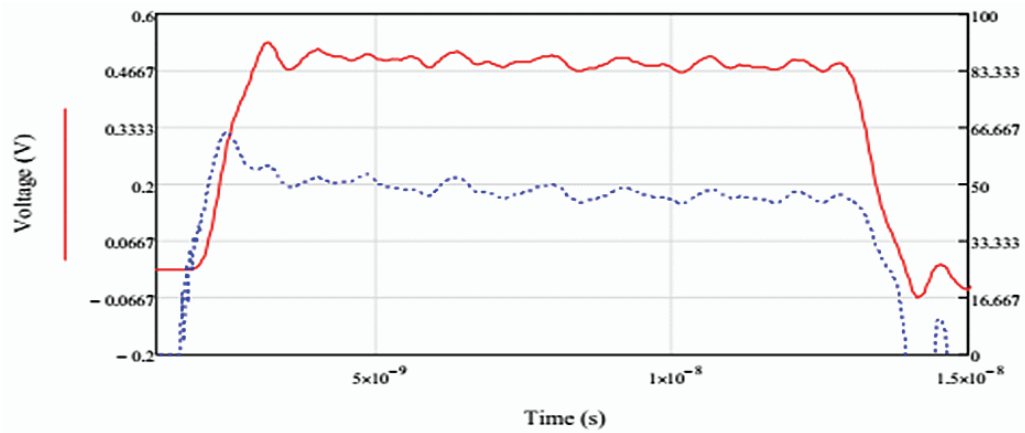
Дослідження проводилися за допомогою аналізатора ланцюгів Keysight N9951A з функцією TDR (TimeDomainReflectometry) – рефлектметрії у часовій області. На рис. 3 подано скріншот розподілу значення хвильового опору вздовж усієї довжини камери GTEM 1500.

Найбільш рівномірний розподіл значення хвильового опору камери спостерігається на відріжку від трьох до шести метрів від початку камери. Періодичні провали хвильового опору, які спостерігаються на

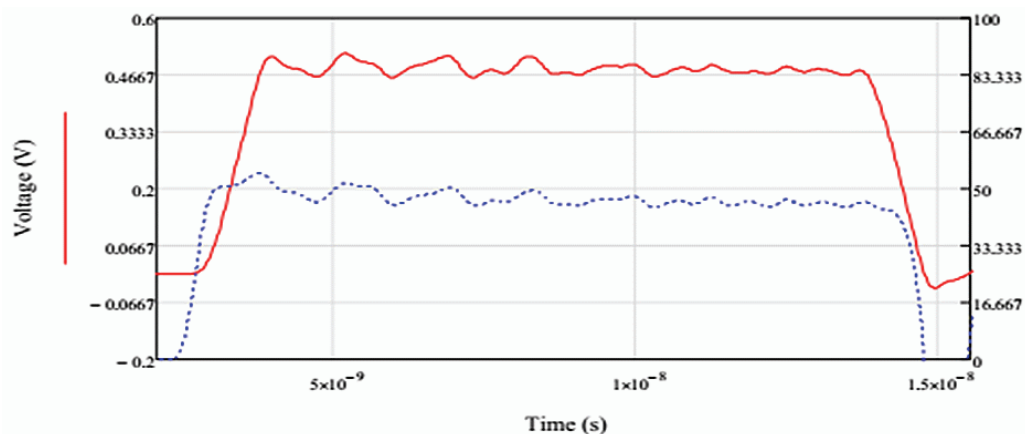
рис. 3, обумовлені технологією виготовлення камери, а саме способом з'єднання листів металу, з яких виготовлена перегородка камери.

На підставі проведення аналізу розподілу значень хвильового опору вздовж камери GTEM1500 було зроблено висновок, що для зменшення невизначеності відтворення одиниці напруженості ЕМП необхідно використовувати ділянки перегородки камери на відстані від початку камери (див. рис. 1-4):

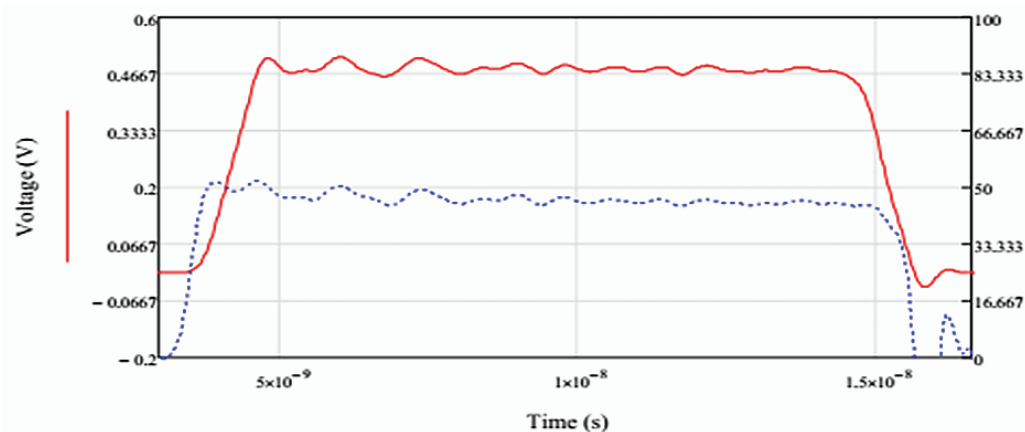
- від 4,14 м до 4,85 м;
- від 5,12 м до 5,85 м.



a



б



в

Рисунок 1 – Поширення трапецієподібних імпульсів напругою 1 В вздовж GTEM-камери

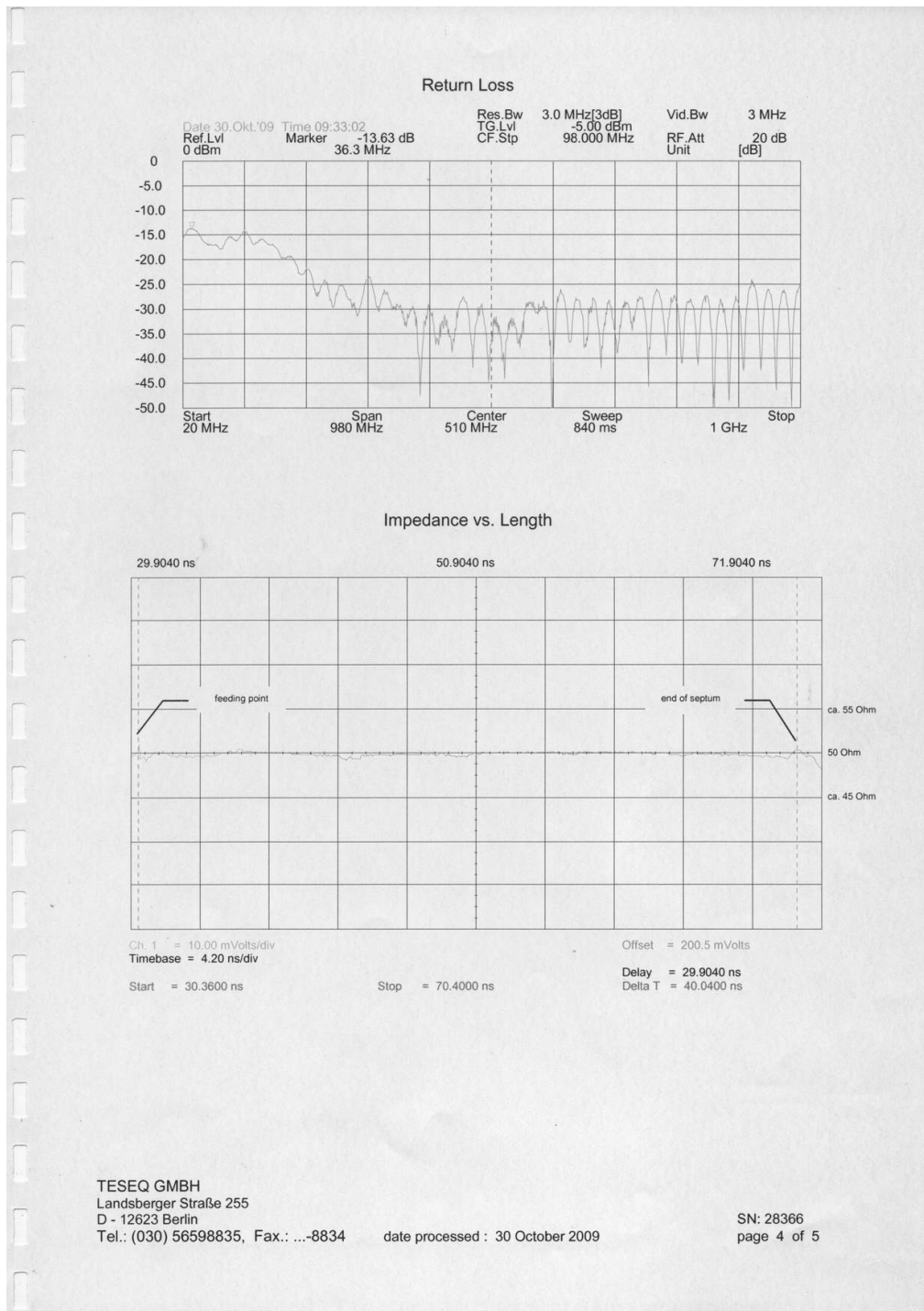


Рисунок 2 – Імпеданс GTEM-камери, наданий виробником

Як видно з рис. 5, нерівномірність значень хвильового опору на визначених ділянках складає менше 0,1 Ом. Це також підтверджує виміряні значення хвильового опору на цих ділянках, що наведені в табл. 2.

В ході досліджень також було вивчено вплив об'єктів калібрування на розподіл значення хвильового опору. Так в камеру GTEM 1500 поміщалися можливі об'єкти калібрування – датчик поля FL7006 та вимірювач напруженості поля NARDA NBM550 з датчиком EF0391. Якщо у випадку розміщення датчика FL7006 розподіл хвильового опору практично не змі-

нювався завдяки малому розміру датчика, то у випадку розміщення вимірювача NARDA NBM550 розподіл хвильового опору змінювався досить суттєво, що представлено на рис. 5.

Ділянка між маркерами 1 і 3 (рис. 5) відповідає збуренню, викликаному розміщенням в камері вимірювача NARDA NBM550. Як видно з рис. 5, розміщення вимірювача в камері викликало зменшення хвильового опору приблизно на 0,3 Ом. З цього можна зробити висновок, що при відтворенні одиниці напруженості ЕМП в камері GTEM, з метою зменшення

невизначеності відтворення, обумовленої відмінністю реального хвильового опору від номінального, необхідно провести вимірювання хвильового опору в площині вимірювань (тобто там де буде розміщено об'єкт калібрування) та врахувати отримане значення при визначенні еталонного рівня напруженості ЕМП.

Для проведення цієї процедури необхідно відкрити опцію TDR (опція 215) у аналізаторі ланцюгів N9951A. Проведені дослідження щодо врахування впливу об'єкта калібрування на розподіл хвильового опору і відповідно напруженості електромагнітного поля, результати яких визначають необхідність постійного контролю значення хвильового опору під час роботи еталонної установки, дають змогу мінімізувати невизначеність відтворення напруженості електромагнітного поля в камері ГТЕМ. За результатами експерименту розширена невизначеність значення хвильового опору може бути обмежена 0,1 Ом.

Таблиця 2 – Значення хвильового опору на відстані від 4,14 м до 5,85 від початку камери

Відстань, м	Хвильовий опір, Ом	Відстань, м	Хвильовий опір, Ом
4,14	50,204	5,12	50,092
4,15	50,203	5,15	50,109
4,20	50,203	5,20	50,114
4,25	50,204	5,25	50,110
4,30	50,190	5,30	50,110
4,35	50,183	5,35	50,106
4,40	50,171	5,40	50,097
4,45	50,158	5,45	50,096
4,50	50,155	5,50	50,090
4,55	50,135	5,55	50,083
4,60	50,122	5,60	50,074
4,65	50,111	5,65	50,067
4,70	50,115	5,70	50,057
4,75	50,120	5,75	50,044
4,80	50,123	5,80	50,034
4,85	50,124	5,85	50,026

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

37% Fri, 21 Jun 2019 4:07:43 PM

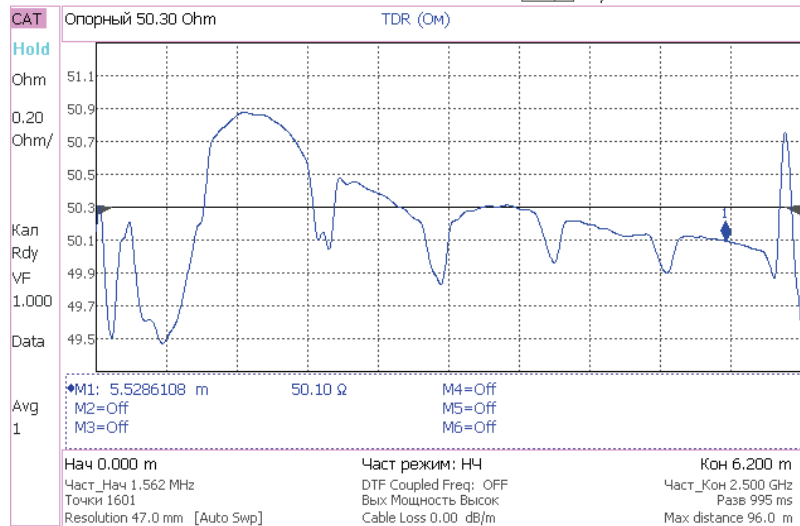


Рисунок 3 – Розподіл значення хвильового опору вздовж камери ГТЕМ1500 TESEQ

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

28% Fri, 21 Jun 2019 4:20:17 PM

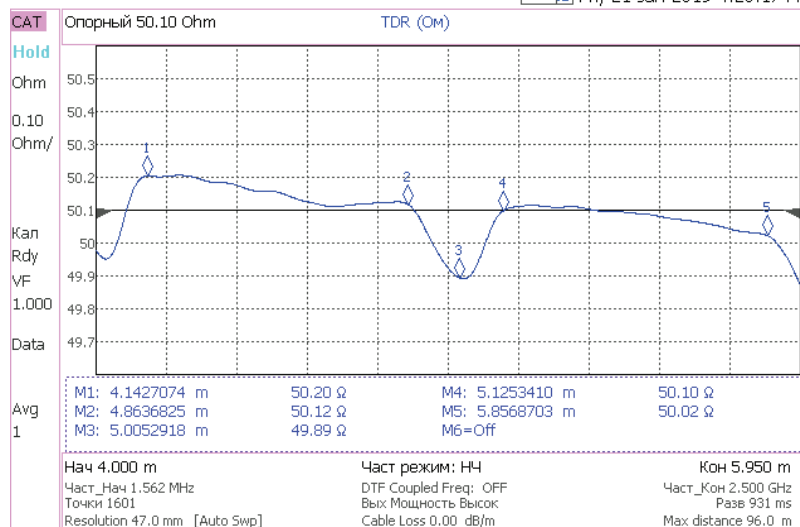


Рисунок 4 – Ділянки перегородки з незначною нерівномірністю хвильового опору

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

25% Fri, 21 Jun 2019 4:25:39 PM

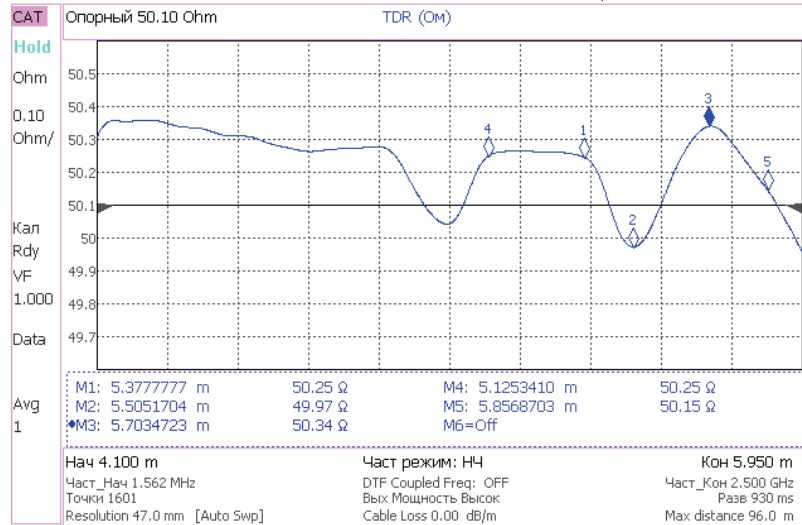


Рисунок 5 – Розподіл хвильового образу

Таблиця 3 – Калькуляція невизначеності калібрування в GTEM-камері

Складові впливу	Максимальна похибка	Розподіл ймовірності	Коефіцієнт впливу	Стандартна невизначеність
Вимірювач потужності	2,0 %	Прямокутний	0,5	0,58 %
Неузгодженість елементів тракту	0,9 %	U-образний	0,5	0,32 %
Загасання атенуаторів	1,5 %	Прямокутний	0,5	0,43 %
Характеристичний імпеданс	0,5 %	Прямокутний	0,5	0,14 %
Корекція на розподіл стоячої хвилі	1,0 %	Прямокутний	0,5	0,29 %
Відстань	0,1 %	Прямокутний	1	0,0577 %
Орієнтація та положення об'єкту, що вимірюється, (зонду)	1,0 %	Прямокутний	1	0,58 %
Сумарна невизначеність				1,03 %
Розширена невизначеність ($k = 2, P = 0,95$)				2,1 %

Оцінювання невизначеності відтворення напруженості еталонної установки, що розробляється, в діапазоні частот 10 кГц – 1 ГГц

На основі приведеного розрахунку було проведено оцінювання невизначеності відтворення напруженості еталона, що розробляється, з урахування особливостей передбачуваної методики проведення вимірювань.

При цьому були зроблені такі припущення щодо розподілу невизначеностей окремих складових:

– оскільки на даному етапі розробки можливо дати оцінки лише максимальних похибок вимірювань окремих складових, обрано прямокутний закон розподілу;

– вплив неузгодженості окремих елементів вимірювального тракту добре апроксимується U-образним розподілом.

Сумарна стандартна невизначеність оцінюється за формулою:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (3)$$

де $u(x_i)$ – складові сумарної стандартної невизначеності;

$\partial y / \partial x_i$ – часткові похідні коефіцієнти чутливості або коефіцієнти впливу.

При цьому вважається, що кореляція між оцінками складових x_i відсутня.

Розширена невизначеність оцінюється за формулою

$$U = k u_c(y) \quad (4)$$

де k – коефіцієнт охопту, який залежить від виду розподілу ймовірностей та довірчої ймовірності P .

Висновки. В даному випадку було прийнято нормальний розподіл ймовірностей та $P = 95 \%$, тобто $k = 2$.

Сумарна відносна стандартна невизначеність оцінюється в 1,3%, а розширена – 2,1%. Отримані результати цілком відповідають вимогам технічних характеристик, що необхідні для еталонної установки.

Список літератури / References

1. *Johns P.B., Beurle R.L.* Numerical solution of two-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. Proc. IEE. 1971. 118(12). P. 1203-1208.
2. *Christopoulos C.* The Transmission-Line Modeling Method: TLM. New Jersey IEEE Press, 1995.
3. *Paul J., Christopoulos C., Thomas D.W.P.* A 3-D Time Domain TLM Electromagnetic Field Solver: regSolve. Nottingham: University of Nottingham. 2000.
4. *Harrington T.E., Zhong C., Foegelle M.D.* GTEM radiated emissions correlation testing and FDTD modeling. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, Washington D.C USA. August 2-6, 1999. P. 770-775.
5. *Crawford M.L.* Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells. Electromagnetic Compatibility. IEEE Transactions on. 1974. EMC-16(4). P. 189-195.
6. *Crawford M.L., Workman J.L., Thomas C.L.* Expanding the Bandwidth of TEM Cells for EMC Measurements. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. 1978. EMC-20(3). P. 368-375.
7. ETS-Lindgren. Gigahertz Transverse Electromagnetic cell (GTEM) Model 5400 Series. Cedar Park, TX. 2005.
8. *Paul J., Christopoulos C., Thomas D.* Technical Report 9SRPE040 WP-N2. University of Nottingham, Nottingham, NG72RD, United Kingdom, May 2001.
9. *Icheln C.* The construction and application of a GTEM cell. Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering, 1995, Technical University of Hamburg-Harburg.
10. *Ishigami S., Harima K., Yamanaka Y.* Estimation of E-field distribution in a loaded GTEM cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. P. 129-134.
11. *De Leo R., Rozzi T., Svara C., Zappelli L.* Rigorous analysis of the GTEM cell. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1991. 39(3). P. 488-500.
12. *Harrington T.E.* GTEM fields FDTD modeling. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Austin, Texas USA, August 18-22. 1997. P. 614-619.
13. *Hansen D., Ristau D., Radasky W.A., Smith K.S.* Sources of problems in the GTEM field structure and recommended solutions. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Santa Clara, California USA, August 19-23, 1996. P. 48-51.
14. *Hansen D., Ristau D., Spaeth T., Radasky W.A., Smith K.S.* Expansions on the GTEM field structure problem. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Atlanta, USA, August 14-18, 1995. P. 538-542.
15. *De Leo R., Schiavoni A.* FDTD evaluation of scattering by metallic objects in GTEM cells. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings. 1994. 141 (4). P. 287-292.
16. *Radasky W.A., Smith K.S., Hansen D., Ristau D.* Calculations and measurements of fast EM pulses in the GTEM cell. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1996. Santa Clara, California USA, August 19-23, 1996. P. 52-57.
17. *Pierantoni L., Rozzi T., De Leo R., Zappelli L.* Numerical modelling of diffraction by objects in GTEM cell. Second International Conference on Computation in Electromagnetics. 1994. P. 351-354.
18. *Malaric K., Sarolic A., Roje V., Bartolic J., Modlic B.* Measured distribution of electric field in GTEM-cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. Vol. 1. P. 139-141.
19. 61000-4-20. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques. Section 20: Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2003.
20. *Wilson P.* On correlating TEM cell and OATS emission measurements. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1995. 37 (1). P. 1-16.

Надійшла (received) 11.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Васильєва Олена Михайлівна (Васильєва Елена Михайловна, Vasilyeva Elena Mikhailovna) – директор центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології», e-mail: koropetc@ukr.net

Макаров Олег Васильович (Макаров Олег Васильевич, Makarov Oleg Vasilievich) – провідний інженер центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології», e-mail: koropetc@ukr.net