

УДК 621.317.3

О.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ 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, підсилувача, 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. Дана стаття є першою частиною узагальнених результатів досліджень.

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

Е.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ 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, критических для величины неопределенности воспроизведения единицы напряженности электромагнитного поля.

Данная статья есть первой частью обобщенных результатов исследований.

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

О.М. VASILYEVA, O.V.MAKAROV**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION 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. This article is the first 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 електромагнітного 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 GTEM-камери, відстані між центральним провідником і заземленою площиною, орієнтацією і розташуванням зонда. Неузгодженості збільшують невизначеність вимірювання переданої потуж-

ності.

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 GTEM-камери;
 Z – хвильовий імпеданс GTEM-камери;
 h – висота перерізу робочої зони.

На даному етапі робіт було досліджено метрологічні характеристики спрямованого відгалужувача DCP0100A, який використано в схемі еталона діапазону частот 10 кГц – 1 ГГц.

На рис. 2 наведені характеристики прямих втрат відгалужувача. На рис. 3 наведено характеристики каналу 1–3 відгалужувача. На рис. 4 наведено характеристики каналу 1 – 4 відгалужувача.

© О.М. Васильєва, О.В. Макаров, 2019

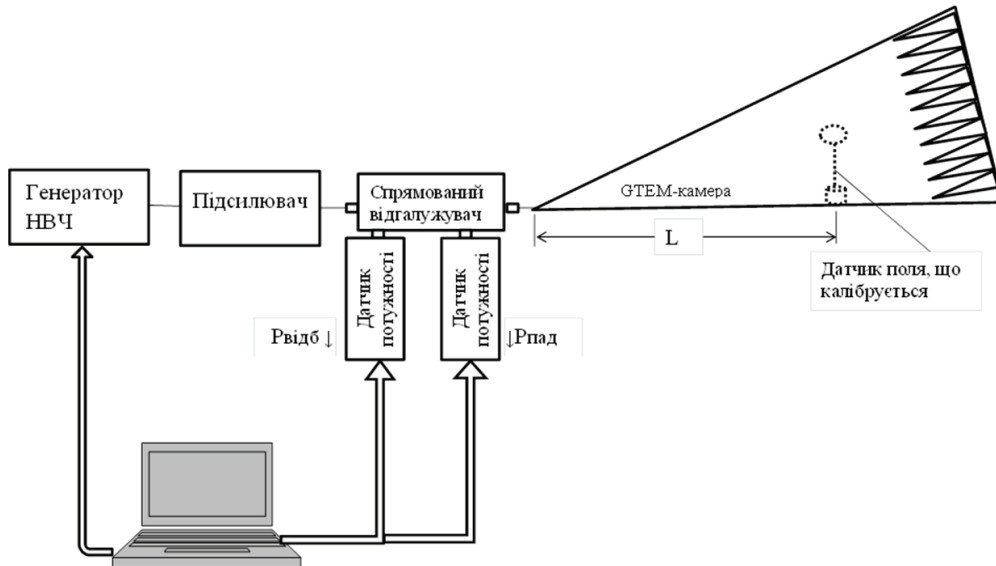
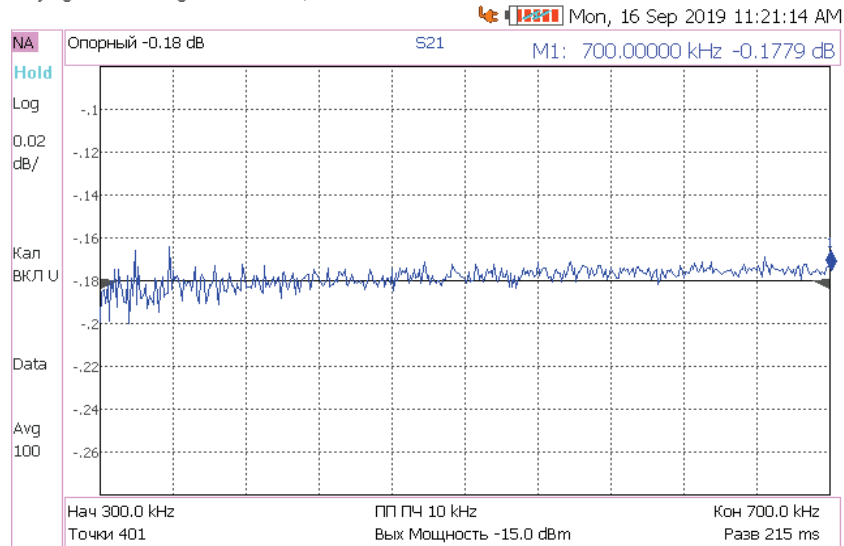


Рисунок 1 – Структурна схема еталонної установки відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля у діапазоні частот від 10 кГц до 1 ГГц

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129



Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

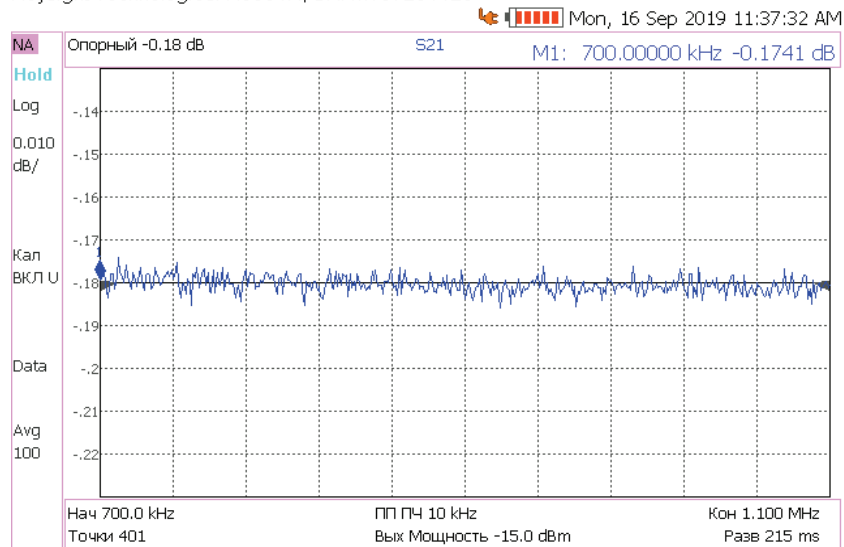
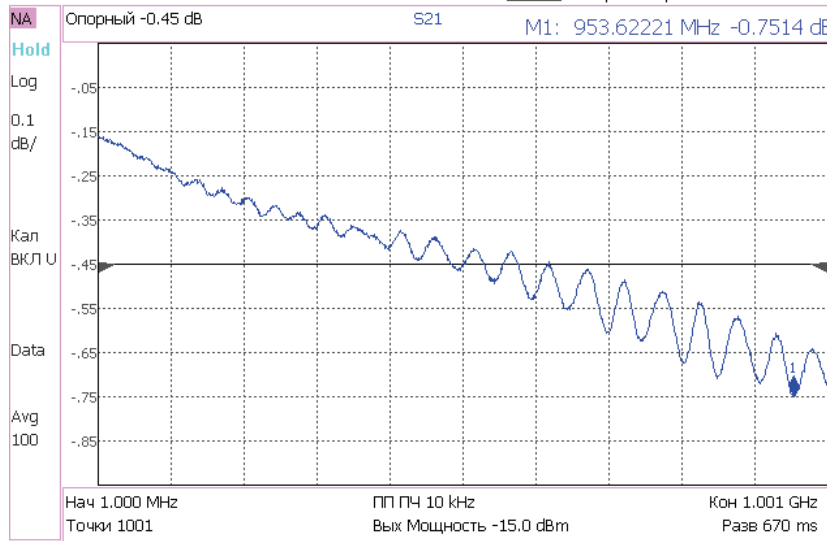


Рисунок 2 – Прямі втрати відгалужувача

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

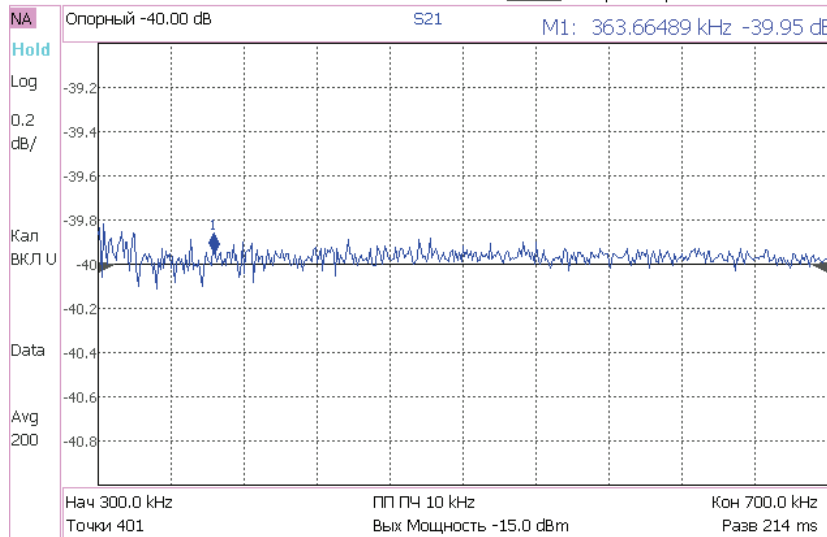
Mon, 16 Sep 2019 10:53:23 AM



Продовження рисунку 2

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:29:21 AM



Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:39:53 AM

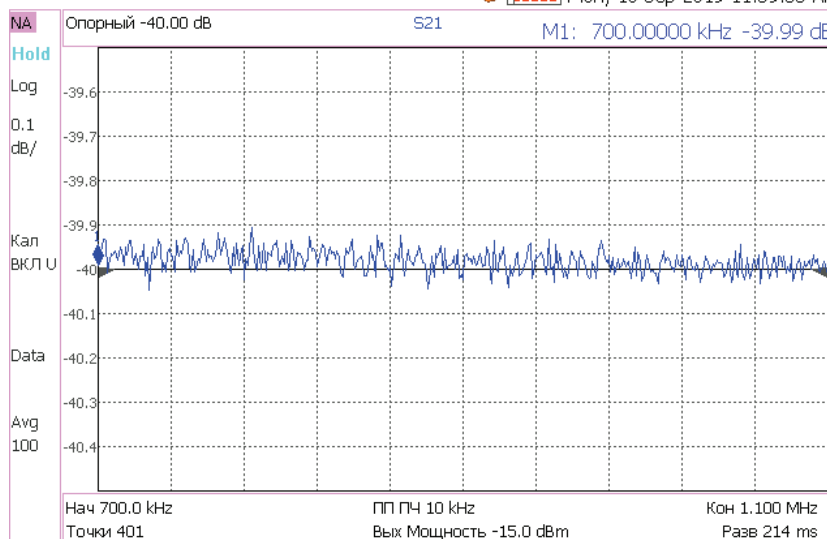
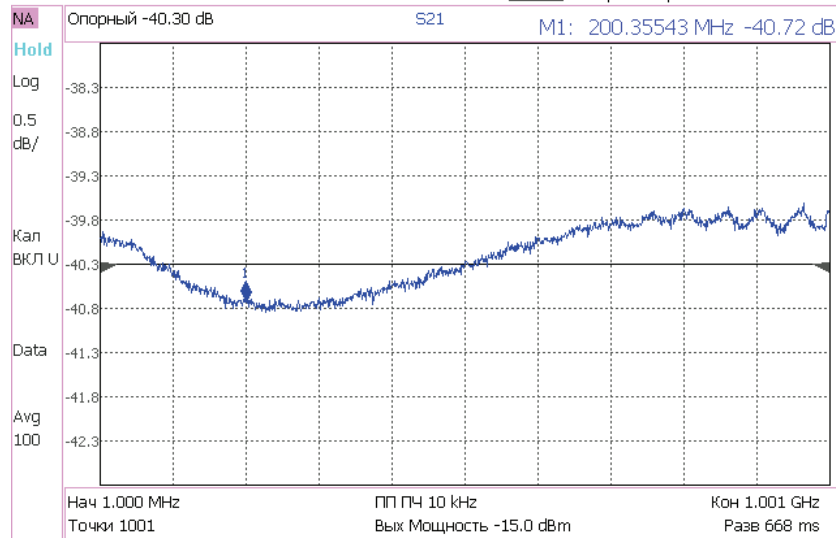


Рисунок 3 – Характеристики канала 1 – 3 відгалужувача

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

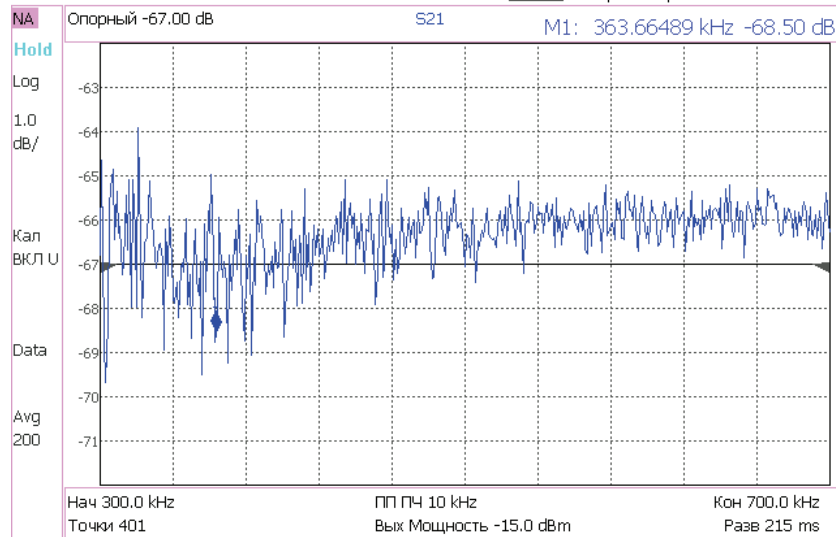
Mon, 16 Sep 2019 11:00:27 AM



Продовження рисунку 3

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:32:23 AM



Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:41:43 AM

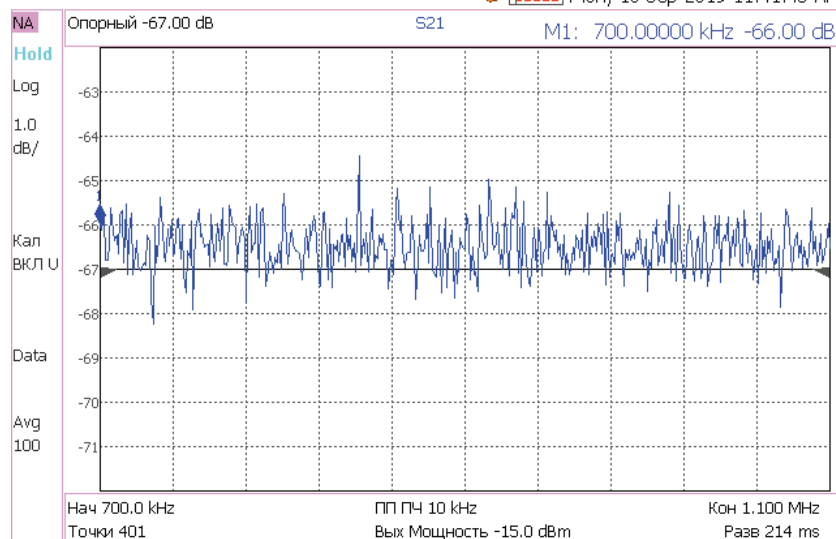
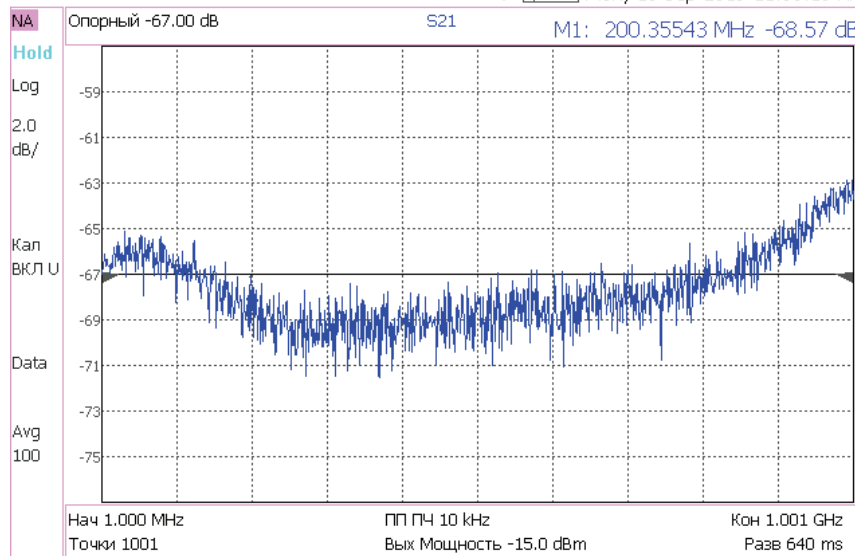


Рисунок 4 – Характеристики каналу 1 – 4 відгалужувача

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:06:10 AM



Продовження рисунку 4

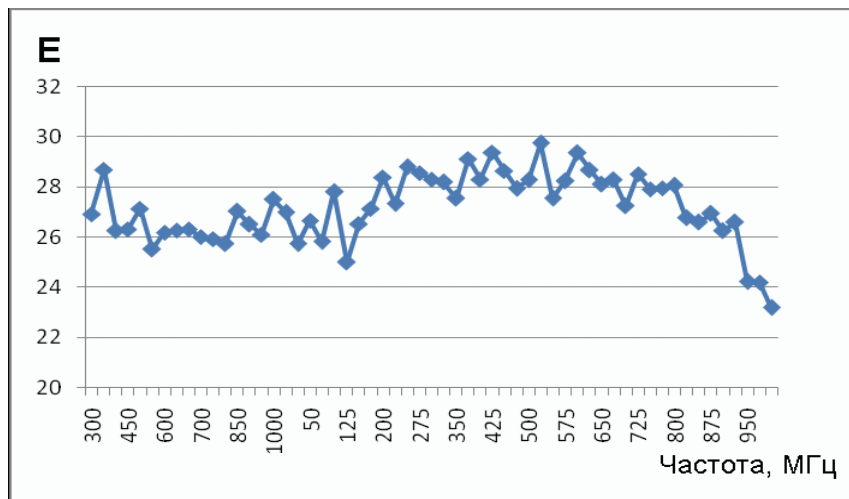


Рисунок 5 – Характеристики спрямованості відгалужувача

Результати досліджень дозволили провести вимірювання в ГТЕМ-камері згідно з рівнянням (1).

Дослідження проводилися за допомогою еталонного вимірювача напруженості електромагнітного поля Narda NMB-550.

Висота площини вимірювання $h = 1,34$ м.

Нахил датчика близько 10 градусів.

Початкова висота датчика по перпендикуляру від підлоги 0,66 м.

Відстань між точками 0,03 м.

Номер точки збільшується зі зменшенням висоти датчика.

Потужність радіочастотного сигналу на вході ГТЕМ-камери, підтримувана в кожній точці 3,592 Вт.

Аналіз результатів дослідження показує, що поле розподілене нерівномірно по частоті та перерізу площини ГТЕМ-камери, тому при визначенні еталонних частотних точок еталонної установки необхідно враховувати результати математичного моделювання, отримані на попередніх етапах. Це в кінцевому підсумку і визначить мінімальне значення невизначеності

еталона. Попередні результати аналізу свідчать про необхідність роботи на висоті 0,6-0,57 м від підлоги (див. рис. 6, 7) з врахуванням частотної залежності розподілу поля у цьому перерізі.

В ході виконання досліджень було розроблено і виготовлено пристрій просторового розташування датчика поля, що досліджується, у камері ГТЕМ. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 8.

Пристрій розташування виготовлено з непровідного матеріалу та дозволяє:

- змінювати висоту розташування датчика поля на 54 см з кроком у 3 см;
- переміщувати датчик поля у горизонтальній площині у вздовж камери ГТЕМ на 36 см з кроком у 3 см;
- регулювати кут нахилу датчика поля;
- розміщувати датчики поля з різним засобами кріплення;
- розташовувати датчик поля практично у будь-якій точці робочого простору камери ГТЕМ.

Таблиця 1 – Результати вимірювання електромагнітного поля

№ точки	Висота	Частота, МГц									
		0,1	0,3	1	3	10	100	200	300	500	1000
Датчик EF0391											
1	0,661	13,17	13,76	12,34	10,875	9,85	9,268	6,875	8,545	9,161	10,38
2	0,63	13,09	13,77	12,36	10,875	9,855	9,367	7,293	8,688	9,07	10,39
3	0,605	12,14	12,71	11,44	10,13	9,201	9,015	6,334	8,279	8,372	9,891
4	0,571	11,49	11,93	10,76	9,626	8,723	8,058	7,778	7,854	8,312	9,893
5	0,54	11,275	11,74	10,62	9,512	8,625	7,863	7,878	7,743	8,226	9,816
6	0,511	10,64	11,03	9,98	8,953	8,18	8,343	5,729	7,857	7,718	10,09
7	0,465	10,02	10,27	9,302	8,397	7,693	8,056	5,511	7,663	7,52	9,628
8	0,444	9,724	9,978	9,079	8,244	7,53	7,804	7,531	7,452	8,235	9,568
Датчик EF1891											
		0,1	0,3	1	3	10	100	200	300	500	1000
1		-	-	-	10,04	9,614	9,11	7,051	8,593	9,167	10,39
2		-	-	-	10,175	9,72	9,273	7,425	8,805	9,065	10,45
3		-	-	-	9,251	8,895	8,87	6,458	8,33	8,365	9,828
4	0,548	-	-	-	8,894	8,518	8,155	7,78	7,98	8,505	9,795
5	0,514	-	-	-	8,593	8,316	8,394	6,345	8,045	7,987	9,94
6	0,465	-	-	-	8,132	7,9	8,21	5,92	7,985	7,762	9,992
7	0,447	-	-	-	7,45	7,294	7,884	5,627	7,837	7,526	9,373
8		-	-	-	7,365	7,165	8,015	7,485	7,582	7,833	9,525

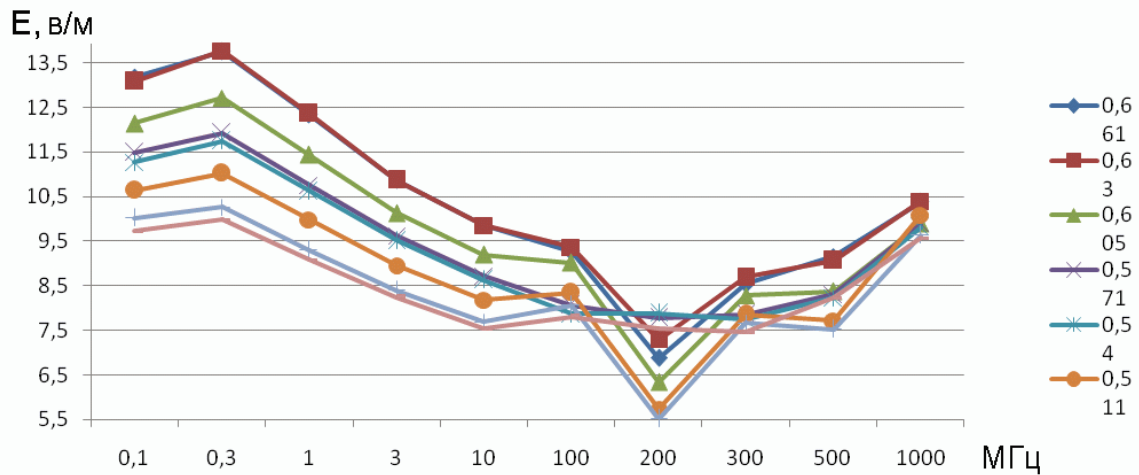


Рисунок 6 – Результати вимірювання електромагнітного поля (Датчик EF0391)

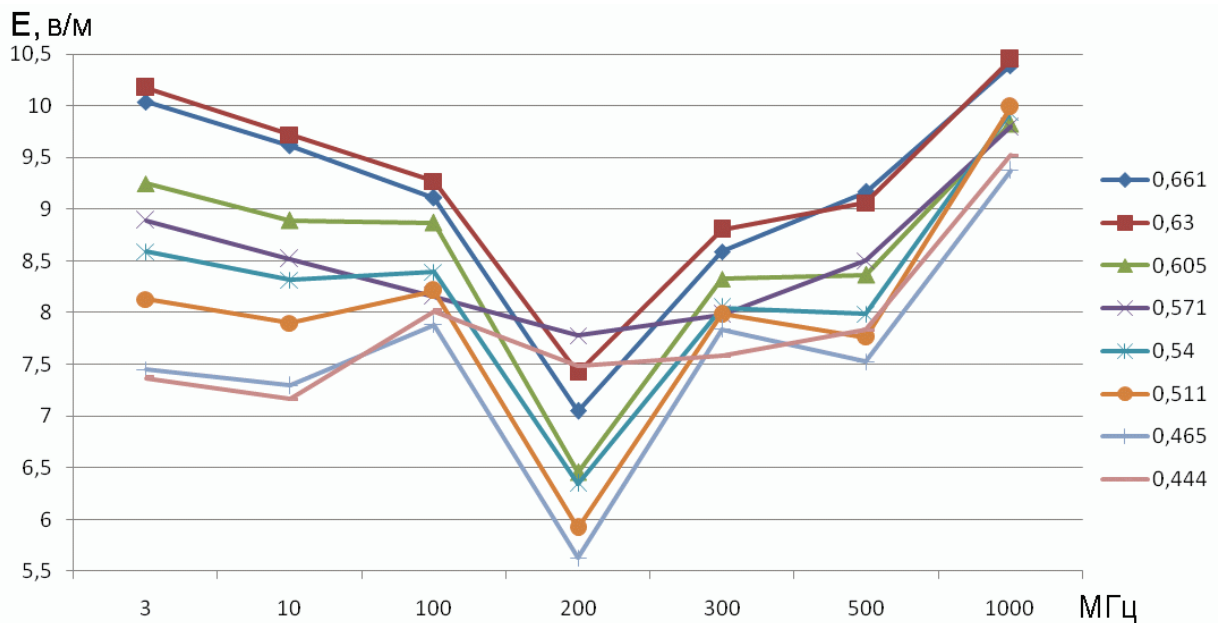


Рисунок 7 – Результати вимірювання електромагнітного поля (Датчик EF1891)



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд датчика Е поля

Список літератури / Bibliography

1. 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.
2. ДСТУ ІЕС 61000-4-20:2013. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості та емісію в TEM-камерах.
3. Wilson P. On correlating TEM cell and OATS emission measurements. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1995. Vol. 37 (1). P. 1-16.
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. and 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. 2005. Cedar Park, TX.
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. Vol. 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. Vol. 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.

Надійшла (received) 04.11.2019

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»,

Макаров Олег Васильович (Макаров Олег Васильевич, Makarov Oleg Vasilievich) – провідний інженер центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології»