





Рис. 1. Структурна схема обладнання НДЕТУ ЕМ-05-2021 на базі ГТЕМ-камери

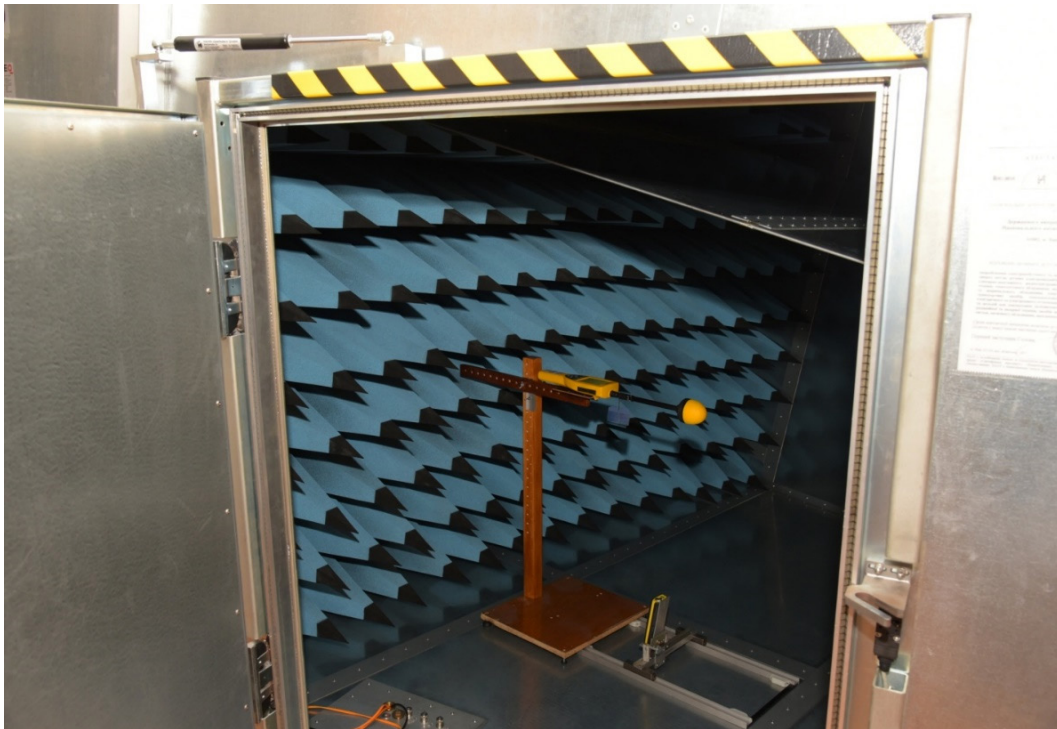


Рис. 2. Установка НДЕТУ ЕМ-05-2021 на базі ГТЕМ-камери

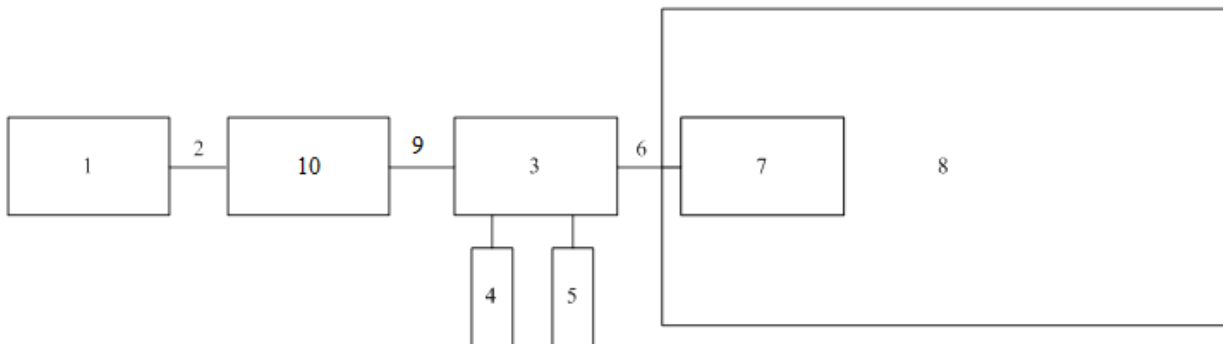


Рис. 3. Структурна схема обладнання НДЕТУ ЕМ-05-2021 на базі безлунневої камери з підсилювачем: 1 – генератор сигналів НВЧ; 2, 6, 9 – кабелі НВЧ; 3 – спрямований відгалужувач; 4 – вимірювачі потужності НВЧ у прямому плечі спрямованого відгалужувача; 5 – вимірювачі потужності НВЧ у зворотному плечі спрямованого відгалужувача; 7 – рупорна антена; 8 – безлуннева камера; 10 – підсилювач потужності

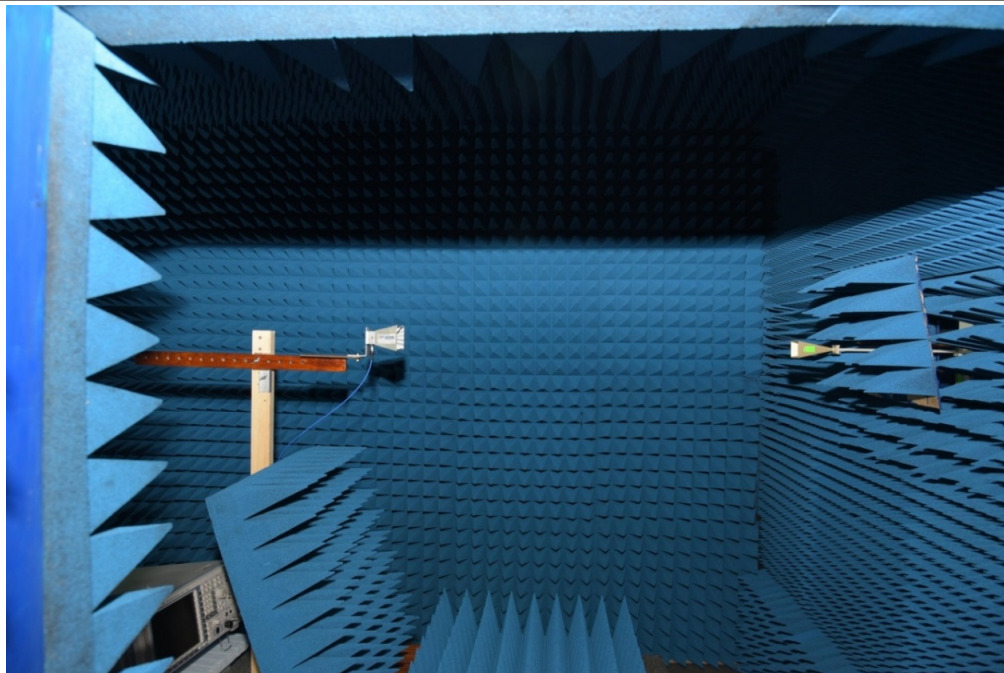


Рис. 4. Установка НДЕТУ EM-05-2021 на базі безлунневої камери

Обладнання, що використовують під час випробувань на відповідність NRE02, NRE03, NRS02 та невизначеність його технічної характеристики, що необхідна для випробувань, наведено в табл. 3.

Це обладнання входить до складу НДЕТУ EM-05-2021 і відкалібровано на таких національних еталонах: Національному еталоні одиниці девіації частоти частотно-модульованих коливань НДЕТУ EM-04-2021, Державному первинному еталоні одиниці потужності електромагнітних коливань у хвилеводних трактах у діапазоні частот від 37,5 до 178,6 ГГц ДЕТУ 09-04-96, Державному первинному еталоні одиниці потужності електромагнітних коливань в коаксіальних трактах у діапазоні частот від 0,03 до 18 ГГц ДЕТУ 09-06-05. Усі державні еталони є первинними, тобто одиниці вимірювань, що вони відтворюють, простежуються до визначальних сталих Міжнародної системи одиниць SI [4].

Випробування обладнання на EMC у GTEM-камері здійснюється з використанням автоматизованої випробувальної системи, яка функціонує під управлінням спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) R&S®EMC32, розробленого фірмою Rohde & Schwarz. EMC EMC32 підтримує та реєструє рівень напруженості електромагнітного поля впливу і рівень сигналу емісії обладнання, що підлягає випробуванням.

У безлунневій камері рівень сигналу забезпечувався власним програмним продуктом ННЦ “Інститут метрології”.

Вимірювання випромінюваної приладом емісії проводилося за допомогою аналізаторів спектра (вимірювальних приймачів) фірми Rohde &

Schwarz FSMR43, ESCI; контроль рівня напруженості поля в безлунневій камері здійснювався за допомогою вимірювача напруженості поля NBM-550 з датчиками:

- електричного поля EF0391;
- електричного поля EF1891.

## 2. Оцінювання невизначеності результатів вимірювань напруженості електромагнітного поля вимірювачем NARDA-550

Визначення калібрувального коефіцієнта вимірювача NARDA-550 здійснюється в GTEM-камері в діапазоні частот 30–1000 МГц і в безлунневій камері в діапазоні частот 1–43 ГГц.

Еталонне значення напруженості електричного поля при проведенні вимірювань у GTEM-камері розраховують за формулою:

$$E_e = \frac{1}{h} \sqrt{P_{кор} \cdot Z_0}, \quad (1)$$

де  $P_{кор}$  – потужність, що подається до входу GTEM-камери;

$Z_0$  – хвильовий опір GTEM-камери;

$h$  – висота перетину робочої зони.

Напруженість електромагнітного поля в безлунневій камері розраховується як

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 \cdot P_{над} \cdot G}, \quad (2)$$

де  $P_{над}$  – вхідна (корисна) потужність передавальної антени;

$G$  – коефіцієнт посилення передавальної антени;

$d$  – відстань від передавальної антени до точки простору, в якій відтворюється значення напруженості  $E$ .

## Характеристики обладнання для випробувань

Найменування	Позначення (тип)	Діапазон частот, рівень вхідного (вихідного) сигналу	Характеристика та її розширена невизначеність	Національний еталон, на якому калібрується обладнання
Випробувальна камера	TESEQ GTEM 1500	Від 0 до 20 ГГц; максимальна потужність, що підводиться: 1000 Вт	Коефіцієнт передавання: 1 дБ	НДЕТУ ЕМ-05-2021
Безлуннєва камера	ЭАМШК.3133.00.00	Від 1 до 43 ГГц, рівень поглинання: від 25 до 50 дБ	Коефіцієнт поглинання: 2 дБ	ДНДЕТУ ЕМ-05-2021
Генератор сигналів	R&S SMC100A	Від 9 кГц до 3,2 ГГц, від +19 дБмВт до -120 дБмВт	Частота: $1 \times 10^{-9} f$ ; рівень сигналу: 0,9 дБ	ДЕТУ 09-06-05
Генератор сигналів	R&S SMF100A	Від 1 до 43,5 ГГц, від +19 дБмВт до -120 дБмВт	Частота: $1 \times 10^{-9} f$ ; рівень сигналу: 0,1 дБ	ДЕТУ 09-06-05, НДЕТУ ЕМ-04-2021
Підсилювач сигналів	BSA 0101-100D	Від 9 кГц до 1 ГГц, вихідна потужність: 100 Вт	Коефіцієнт посилення: 0,5 дБ	ДЕТУ 09-06-05
Підсилювач сигналів	BLWA 0830 100/80D	Від 80 до 1000 МГц, вихідна потужність: 100 Вт; від 1 до 3 ГГц, вихідна потужність: 80 Вт	Коефіцієнт посилення: 0,5 дБ	ДЕТУ 09-06-05
Підсилювач сигналів	BLMA 2060-50	Від 2 до 6 ГГц, вихідна потужність: 50 Вт	Коефіцієнт посилення: 0,5 дБ	ДЕТУ 09-06-05
Антенa рупорна	П6-23А	Від 0,8 до 18 ГГц	Коефіцієнт посилення: 0,5 дБ	НДЕТУ ЕМ-05-2021
Зонд електричного поля	FL7006	Від 100 кГц до 6 ГГц	Напруженість ЕМП: від 5 кГц до 1 ГГц - 0,8 дБ; від 1 до 6 ГГц - 1,4 дБ	НДЕТУ ЕМ-05-2021
Приймач вимірювальний	R&S FSMR 43	Від 20 Гц до 43 ГГц; від +10 дБмВт до -138 дБмВт	Частота: $1 \times 10^{-9}$ ; рівень сигналу: 0,1 дБ	ДЕТУ 09-06-05, ДЕТУ 09-04-96, НДЕТУ ЕМ-04-2021
Ширококутний вимірювач напруженості електромагнітного поля	NARDA NBM-550 із давачем EF1891	Від 3 МГц до 18 ГГц	Напруженість поля: 1,3 дБ	НДЕТУ ЕМ-05-2021
Аналізатор електромагнітного поля	NARDA EHP-50F	Від 1 Гц до 400 кГц	Напруженість поля: 1,0 дБ	НДЕТУ ЕМ -05-2021
Система визначення параметрів навколишнього середовища	СОПОС-1		Тиск: від 84 до 106,6 кПа, $U=0,14$ кПа; температура: від 5 до 50 °С, $U=0,13$ °С; вологість: від 10 до 95%, $U=1,8\%$	ДЕТУ 06-05-98 ДЕТУ 05-04-13

**2.1. Оцінювання невизначеності результатів вимірювань у діапазоні частот 10 кГц – 1 ГГц**

Невизначеність відтворення електромагнітного поля в ГТЕМ-камері складається з невизначеностей, пов'язаних із вимірюванням радіочастотної потужності, значенням характеристичного імпедансу ГТЕМ-камери, вимірюванням відстані між центральним провідником і заземленою площиною, орієнтацією і розташуванням зонда. Неузгодженості збільшують невизначеність вимірювання переданої потужності.

Відтворене електромагнітне поле обчислюється за формулою:

$$E = k_f \frac{\sqrt{P \cdot Z}}{h}, \quad (3)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля;

$k_f$  – нерівномірність розподілу ЕМП у площині сенсора на частоті вимірювання;

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

$Z$  – хвильовий імпеданс ГТЕМ-камери;

$h$  – висота перетину робочої зони.

Абсолютна сумарна стандартна невизначеність  $u_E$  реалізації напруженості  $E$  визначається за формулою:

$$u_{cE} = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)^2 \cdot u_p^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial Z}\right)^2 \cdot u_z^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial h}\right)^2 \cdot u_h^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial k_f}\right)^2 \cdot u_{k_f}^2 + u_{AE}^2}, \quad (4)$$

де  $u_{k_f}$  – невизначеність, пов'язана з нерівномірністю розподілу ЕМП у площині сенсора на частоті вимірювання;

$u_p$  – невизначеність значення потужності  $P$ , що подається до входу ГТЕМ-камери;

$u_z$  – невизначеність значення хвильового імпедансу  $Z$  ГТЕМ-камери;

$u_h$  – невизначеність значення висоти  $h$  перетину робочої зони;

$u_{AE}$  – абсолютний стандартний відхил повторюваності (repeatability) оцінки  $E$ .

З урахуванням (3–4) відносно сумарну стандартну невизначеність  $w_{cE}$  реалізації напруженості  $E$  можна оцінити за формулою:

$$w_{cE} = \frac{u_{cE}}{E} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}w_p\right)^2 + \left(\frac{1}{2}w_z\right)^2 + (w_h)^2 + (w_{k_f})^2 + (w_{AE})^2}, \quad (5)$$

де  $w_p = u_p/P$ ,  $w_z = u_z/Z$ ,  $w_h = u_h/h$ ,  $w_{k_f} = u_{k_f}/k_f$  – відносні стандартні невизначеності величин  $P$ ,  $Z$ ,  $h$  та  $k_f$  відповідно;

$w_{AE} = u_{AE}/E$  – відносний стандартний відхил повторюваності оцінки  $E$ .

Бюджет невизначеності при калібруванні в ГТЕМ-камері наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Бюджет невизначеності при калібруванні в ГТЕМ-камері

Позначення	Джерело невизначеності	Відн. станд. невизначеність		Закон розподілу ймовірностей	Коефіцієнт чутливості	Вклад невизначеності		Примітка
		%	дБ			%	дБ	
$E$	Повторюваність вимірювань	0,35	0,03	нормальний	1	0,35	0,03	
$P$	Неточність оцінки потужності	1,098	0,17	прямокутний	0,5	0,549	0,085	
$Z$	Неточність оцінки імпедансу	0,58	0,05	прямокутний	0,5	0,29	0,025	
$h$	Неточність оцінки висоти	0,04	0,03	прямокутний	1	0,04	0,03	
$k_f$	Нерівномірність розподілу ЕМП	2,31	0,2	прямокутний	1	2,31	0,2	$f = 100$ МГц
		2,89	0,25			2,89	0,25	$f = 900$ МГц
$w_{cE}$	Сумарна станд. невизначеність			нормальний		<b>2,64</b>	<b>0,22</b>	$f = 100$ МГц
						<b>3,16</b>	<b>0,27</b>	$f = 900$ МГц
$W_{cE}$ (95%)	Розширена невизначеність			нормальний ( $k = 2$ )		<b>5,28</b>	<b>0,44</b>	$f = 100$ МГц
						<b>6,32</b>	<b>0,5</b>	$f = 900$ МГц



**2.2. Оцінювання невизначеності результатів вимірювань у діапазоні частот 1–43 ГГц**

Напруженість електромагнітного поля (далі – ЕМП) у безлунневій камері розраховується за формулою:

$$E = \frac{1}{d} k_f \sqrt{30 \cdot P \cdot G}, \quad (6)$$

де  $P$  – вхідна (корисна) потужність передавальної антени;

$G$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

$k_f$  – нерівномірність розподілу ЕМП у площині сенсора на частоті вимірювання;

$d$  – відстань від передавальної антени до точки простору, в якій відтворюється значення напруженості  $E$  ЕМП.

Абсолютна сумарна стандартна невизначеність  $u_E$  реалізації напруженості  $E$  визначається за формулою:

$$u_{cE} = \sqrt{30} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)^2 \cdot u_P^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial G}\right)^2 \cdot u_G^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial d}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial k_f}\right)^2 \cdot u_{k_f}^2 + u_{AE}^2}, \quad (7)$$

де  $u_{k_f}$  – невизначеність, пов’язана з нерівномірністю розподілу ЕМП у площині сенсора на частоті вимірювання;

$u_P$  – невизначеність потужності випромінювання передавальної антени  $P$ ;

$u_G$  – невизначеність коефіцієнта посилення передавальної антени;

$u_d$  – невизначеність відстані до передавальної антени;

$u_{AE}$  – абсолютний стандартний відхил повторюваності (repeatability) оцінки  $E$ .

З урахуванням (6, 7) відносну сумарну невизначеність  $w_{cE}$  реалізації напруженості  $E$  можна оцінити за формулою:

$$w_{cE} = \frac{u_{cE}}{E} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} w_P\right)^2 + \left(\frac{1}{2} w_G\right)^2 + (w_d)^2 + (w_{k_f})^2 + (w_{AE})^2}, \quad (8)$$

де  $w_P = u_P/P$ ,  $w_G = u_G/G$ ,  $w_d = u_d/d$ ,  $w_{k_f} = u_{k_f}/k_f$  – відносні стандартні невизначеності величин  $P$ ,  $G$ ,  $d$  та  $k_f$  відповідно;  $w_{AE} = u_{AE}/E$  – відносний стандартний відхил повторюваності оцінки  $E$ .

У свою чергу, кожна зі складових невизначеностей залежить від ряду факторів.

Бюджет невизначеності при калібруванні у безлунневій камері наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Бюджет невизначеності при калібруванні у безлунневій камері

Позначення	Джерело невизначеності	Відн. станд. невизначеність		Закон розподілу ймовірностей	Коефіцієнт чутливості	Вклад невизначеності		Примітка	
		%	дБ			%	дБ		
$E$	Повторюваність вимірювань	0,35	0,03	нормальний	1	0,35	0,03		
$P$	Потужність на вході безлунневої камери (з урахуванням калібрування відгалужувача, ватметра) 1–18 ГГц 18–43 ГГц	1,098	0,17	прямокутний	0,5	0,549	0,085		
$G$	Калібрування антени (з урахуванням КСХ) 1–18 ГГц 18–43 ГГц	2,89 3,46	0,25 0,29	прямокутний	0,5	1,45 1,73	0,12 0,15		
$d$	Відстань до антени (центр сенсора напруженості ЕМП)	0,04	0,03	прямокутний	1	0,04	0,03		
$k_f$	Розподіл ЕМП у площині сенсора ЕМП 1–18 ГГц 18–43 ГГц	0,58	0,05	прямокутний	1	0,58	0,05	$f= 1-18$ ГГц	
		0,87	0,07			0,87	0,07	$f= 18-43$ ГГц	
$w_{cE}$	Сумарна станд. невизначеність			нормальний			<b>3,17</b>	<b>0,22</b>	$f= 1-18$ ГГц
					<b>3,5</b>	<b>0,27</b>	$f= 18-43$ ГГц		
$W_{cE}$ (95%)	Розширена невизначеність			нормальний ( $k= 2$ )			<b>6,35</b>	<b>0,55</b>	$f= 1-18$ ГГц
					<b>7,1</b>	<b>0,6</b>	$f= 18-43$ ГГц		

Результати вимірювань калібрувального коефіцієнта

Частота, МГц	Сенсор NARDA-550	Значення калібрувального коефіцієнта	Розширена невизначеність ( $k=2$ ), дБ
100	EF0391	0,953	0,44
900	EF0391	1,009	0,50
11000	EF1891	0,85	0,55
26500	EF5092	0,836	0,60

### 2.3. Визначення калібрувального коефіцієнта NARDA-550

Бюджет невизначеності слугує дієвим інструментом для аналізування можливих шляхів зменшення розширеної невизначеності. Так, із наведеного бюджету випливає, що найбільш критичними є невизначеності вимірювань при калібруванні антени в безлунневій камері та нерівномірність розподілу електромагнітного поля у GTEM-камері.

Отримані значення калібрувального коефіцієнта вимірювача напруженості електромагнітного поля NARDA-550 наведені у табл. 6 (кількість вимірювань на кожній частоті – 10). Ці результати з розбіжністю не більше 0,05 дБ підтверджують характеристики приладу, надані виробником.

### Висновки

Комплекс національних еталонів та випробувального обладнання ННЦ “Інститут метрології” при проведенні випробувань спеціального обладнання на електромагнітну сумісність за стандартами НАТО забезпечує необхідну точність та метрологічну простежуваність результатів вимірювань до Міжнародної системи одиниць (SI).

Результати оцінювання невизначеності калібрувального коефіцієнта NARDA-550 дають можливість враховувати нерівномірність розподілу електромагнітного поля при проведенні випробувань на відповідність NRE02, NRE03, NRS02 при високоточному вимірюванні радіочастотних сигналів як при емісії, так і при впливі електромагнітних полів, коли збурення мають граничні значення щодо норм цих стандартів.

## Metrological traceability of the results of testing for electromagnetic compatibility in accordance with the NATO standards

O. Vasylieva, P. Neyezhnikov

National Scientific Centre “Institute of Metrology”, Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
koropets@ukr.net

### Abstract

Ensuring the electromagnetic compatibility of special-purpose equipment used in a complex saturated radio frequency environment requires testing in accordance with procedures that guarantee a valid verification of its immunity to external electromagnetic fields. The paper presents the national measurement standards and equipment used at the National Scientific Centre “Institute of Metrology” for the NRE02, NRE03 and NRS02 testing in accordance with the AESTR-500 standard. It is shown how metrological traceability to the SI units of the measurement results is ensured during tests. The paper presents the results of evaluating the uncertainty of the results of measurements of the electromagnetic field strength using the NARDA-550 meter for the frequency ranges of 10 kHz<sup>-1</sup> GHz when using the GTEM chamber, and for the frequency



ranges of 1-43 GHz when using the anechoic chamber. The studies have proven that the measurement uncertainties, when calibrating the antenna in the anechoic chamber, and the uneven distribution of the electromagnetic field in the GTEM chamber are the most critical. The obtained results of the uncertainty evaluation of the NARDA-550 calibration coefficient are used for high-precision measurements of radio frequency signals both at emission and being exposed to electromagnetic fields when the disturbances have limit values as regards the provisions of these standards. These results with a discrepancy of no more than 0.05 dB confirm the characteristics of the device provided by the manufacturer. It is shown that the set of national measurement standards and test equipment of the NSC "Institute of Metrology" allows testing special equipment for electromagnetic compatibility according to the NATO standards with the required accuracy.

**Keywords:** standards; measurement standards; metrological traceability; calibration; testing; electromagnetic compatibility; electromagnetic immunity; critical infrastructure.

#### Список літератури

1. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-%D0%BF#>
2. STANAG 4370 AECTP-500:2016. Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification Ed. E Ver.1, DECEMBER 2016. 1125 p.
3. MIL-STD-461G:2015. Department of Defense USA. Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. 280 p.
4. Неєжмаков П.І., Буряковський С.Г., Васильєва О.М., Величко В.А., Веніславський Ф.В., Руденко С.С. Запровадження стандартів НАТО для підвищення електромагнітної стійкості та сумісності обладнання об'єктів критичної інфраструктури. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 1. С.9–20. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282464>

#### References

1. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-%D0%BF#>
2. STANAG 4370 AECTP-500:2016. Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification Ed. E Ver. 1, DECEMBER 2016. 1125 p.
3. MIL-STD-461G:2015. Department of Defense USA. Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. 280 p.
4. Nevezhnikov P., Buriakovskiy S., Vasyliieva O., Velychko V., Venislavskiy F., Rudenko S. Zaprovdzhennia standartiv NATO dlia pidvyshchennia elektromahnitnoi stiiikosti ta sumisnosti obladnannia ob'iektiv krytychnoi infrastruktury [Implementation of NATO standards to improve the electromagnetic immunity and compatibility of equipment of the critical infrastructure objects]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2023, no. 1, pp. 9–20 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282464>