

*Стригун В.В., Барвінок Р.Д., Білоус О.В., Толмачов В.Ю. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ ВИПРОБУВАНЬ НАВІГАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ СПОЖИВАЧІВ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМІТАТОРА НАВІГАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ**

*У статті проведено аналіз існуючих методик випробування апаратури споживачів супутникових навігаційних систем різного функціонального призначення, запропоновано методичний підхід щодо організації проведення випробувань апаратури споживачів ГНСС, який полягає в наступному: розробка варіантів використання обладнання з використанням імітатора навігаційних сигналів; методика оцінки точності визначення координат і швидкості, а також завадозахищеності апаратури споживачів ГНСС.*

**Ключові слова:** *глобальні навігаційні супутникові системи, супутникова навігація, апаратура споживачів, випробування озброєння та військової техніки, методичний апарат випробувань, методика оцінки точності визначення координат.*

**Актуальність** цієї статті обумовлена тим, що створення сучасних та вдосконалення (модернізація) існуючих зразків озброєння та військової техніки (далі – ОВТ) різного призначення, до складу якої входить апаратура, що використовує сигнали глобальних навігаційних супутникових систем (далі – ГНСС), потребує формування нового підходу до вибору методів випробувань та їх реалізації.

Супутникові навігаційні технології широко застосовуються у всьому світі. Існуючі системи постійно модернізуються, вводяться нові супутники, удосконалюються супутникові сигнали, створюються сигнали військового призначення, більш стійкі до впливу завад, розгортаються наземні системи навігації, поліпшуються характеристики апаратури споживачів ГНСС.

Перші офіційні зусилля з визначення процедур тестування для приймачів GPS визначені в статті [1], в якій розглянуті ключові концепції стандарту [2]. Такі процедури були широко застосовані виробниками апаратури споживачів ГНСС та через два десятиліття випробувальні організації все ще посилаються на них у своїх офіційних документах. Відсутність національних стандартів, які регламентують процес випробувань апаратури споживачів ГНСС, викликає потребу розробки процедур тестування, що дозволить врахувати досвід європейських стандартів та імплементувати вимоги стандартів блоку НАТО. Таким чином, розробка процедур тестування дозволить вимірювати наступні характеристики: чутливість приймача при виявленні та супроводженні, час між першим та повторним виявленням, статичну та динамічну точність виявлення місцезнаходження та стійкість до багатопроменевих та радіочастотних завад.

Крім того, при проведенні випробувань, тестування, визначення технічних характеристик апаратури споживачів ГНСС виникає ціла низка проблем [3]:

1. складно забезпечити повну повторюваність експериментів;
2. невизначений рівень потужності сигналів від навігаційних супутників на вході пристрою, що тестується;
3. практична організація випробувань апаратури ГНСС, яка входить до складу авіаційних, морських зразків озброєння, а також ракет, складна і має високу вартість.

Використання генераторів сигналів для моделювання ГНСС має переваги перед використанням реального ГНСС-сигналу. Це пов'язано з тим, що під час використання реальних сигналів, умови випробувань змінюються постійно і непередбачувано, тому малоімовірно, що два однакових послідовних випробування будуть виконані в однакових умовах.

Випробування із застосуванням реальних сигналів ГНСС унеможлиблює справжнє

порівняння подібного з подібним.

Проведення тесту “go/no-go” (“на ходу/без руху”) для апаратури з використанням сигналів ГНСС є проблематичним. Залежно від призначення, приймач, можливо, потребуватиме тестування не лише в лабораторних, але й у реальних умовах, оскільки спостережувані показники значною мірою залежать від самої системи ГНСС.

Вирішення вказаних проблем можливе завдяки розробці сучасного методичного апарату проведення випробувань та використанню сучасного обладнання, а саме: імітаторів, апаратури запису та відтворення сигналів ГНСС, апаратури генерації сигналів широкого спектру, програмного забезпечення для тестування апаратури споживачів ГНСС в лабораторних умовах.

Вказані заходи дозволяють повністю автоматизувати процес випробування шляхом багаторазового виконання заданих користувачем сценаріїв. Тому, метою статті є вдосконалення методичного апарату організації проведення випробувань та розробка пропозицій щодо варіантів застосування обладнання для проведення випробування апаратури споживачів ГНСС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** щодо існуючих нормативних документів щодо тестування апаратури споживачів ГНСС свідчить про те що, незважаючи на зростаючу кількість та розширення сфер їх застосування, існує не так багато міжнародних стандартів, які регламентують процес випробувань навігаційної апаратури.

Існують стандарти продуктивності для критично важливої інфраструктури, такі як 3GPP для стільникового зв'язку та ITU G.8272 для точної синхронізації часу в мережах 4G, LTE і 5G. В авіації існує безліч стандартів безпеки життя, наприклад, стандарти RTCA DO, що стосуються заходу на посадку і посадки за допомогою апаратури споживачів ГНСС. Існують європейські стандарти, що регламентують питання роботи апаратури споживачів [4, 5]. Крім того, є стандарти НАТО [6], “INTRODUCTION TO NAVSTAR GPS USER EQUIPMENT” (Представлення обладнання користувача супутникової глобальної радіонавігаційної системи NAVSTAR GPS), “THE NATO SATELLITE NAVIGATION WARFARE (NAVWAR) FRAMEWORK” (Основи супутникової навігаційної боротьби НАТО (NAVWAR)), “GUIDANCE FOR IFR CERTIFICATION OF NAVIGATION SYSTEMS USING GPS PPS” (Настанова щодо сертифікації навігаційних систем, які використовують службу точного позиціонування Системи глобального позиціонування (GPS PPS) на відповідність Правилам польотів за приладами (IFR)), “THE NATO GUIDELINE FOR GNSS USER EQUIPMENT STANDARDIZED FIELD TEST SCENARIOS” (Стандартизовані сценарії випробувань в умовах реальної експлуатації обладнання користувача Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS)), “NAVIGATION WARFARE DEFINITION – ANP-4621 EDITION A” (Визначення поняття “Навігаційна боротьба”).

**Виклад основного матеріалу.** Практичний досвід проведення випробувань систем з підтримкою ГНСС свідчить, що на результат вимірювань впливає безліч різних чинників – від внутрішньої схеми пристроїв до середовища розповсюдження сигналу, в якій вони використовуються. У цій роботі запропоновано методичний апарат, що дозволить проводити випробування апаратури ГНСС та характеризувати продуктивність системи, гарантувати відповідність стандартам якості виробника та очікуванням кінцевого користувача. Запропоновані тестові сценарії оцінюють показники ефективності приймача за такими основними параметрами:

- точність позиціонування;
- кількість ГНСС, що підтримуються;
- стійкість до завад;
- розпізнавання підроблених сигналів;
- підтримка кодів військового призначення;
- час до першого виявлення координат;
- чутливість приймача;
- обмеження по швидкості;

час повторного виявлення.

У лабораторних умовах під час випробувань апаратури споживачів ГНСС рівень сигналу повинен регулюватись в залежності від завдань експерименту. Наприклад, дозволяти дискретне ослаблення для точного визначення порогу чутливості приймача, а також повинен мати гнучкість для створення сценаріїв, які можуть представляти ймовірне використання в реальних умовах та змушувати приймач працювати на межі його ефективності.

Створене навігаційне поле повинно бути повним і достовірним, піддаючи пристрій реалістичним сигналам у всій їх складності та деталізації, при цьому тести повинні бути спроможними повторюватись. Як наслідок, ступінь автоматизації тестування ГНСС підвищує якість випробувань.

Випробування апаратури споживачів ГНСС в лабораторних умовах можливе із застосуванням імітаторів навігаційних сигналів. Такі імітатори виробляють вітчизняні та зарубіжні фірми. Імітатори розрізняються додатковими можливостями по імітації різних сценаріїв руху, багатопроменевого випромінювання, обліку поширення радіохвиль через атмосферу та інше (табл. 1).

Таблиця 1

Існуючі імітатори навігаційних сигналів

Назва	Виробник
R&S@SMBV100B	Rohde&schwarz, Швейцарія
GSS700, GSS9000	Spirent Communications plc, США
GSG-5	Spectracom, США
CH-3810	ТОВ "КБ Центр", Україна

Також важливою складовою випробувань є використання генераторів сигналів різноманітних діапазонів, що здатні працювати разом з імітаторами та іншим обладнанням.

На рисунку 1 зображено варіант застосування апаратури споживачів ГНСС в лабораторних умовах із застосуванням імітатора навігаційних сигналів CH-3810.

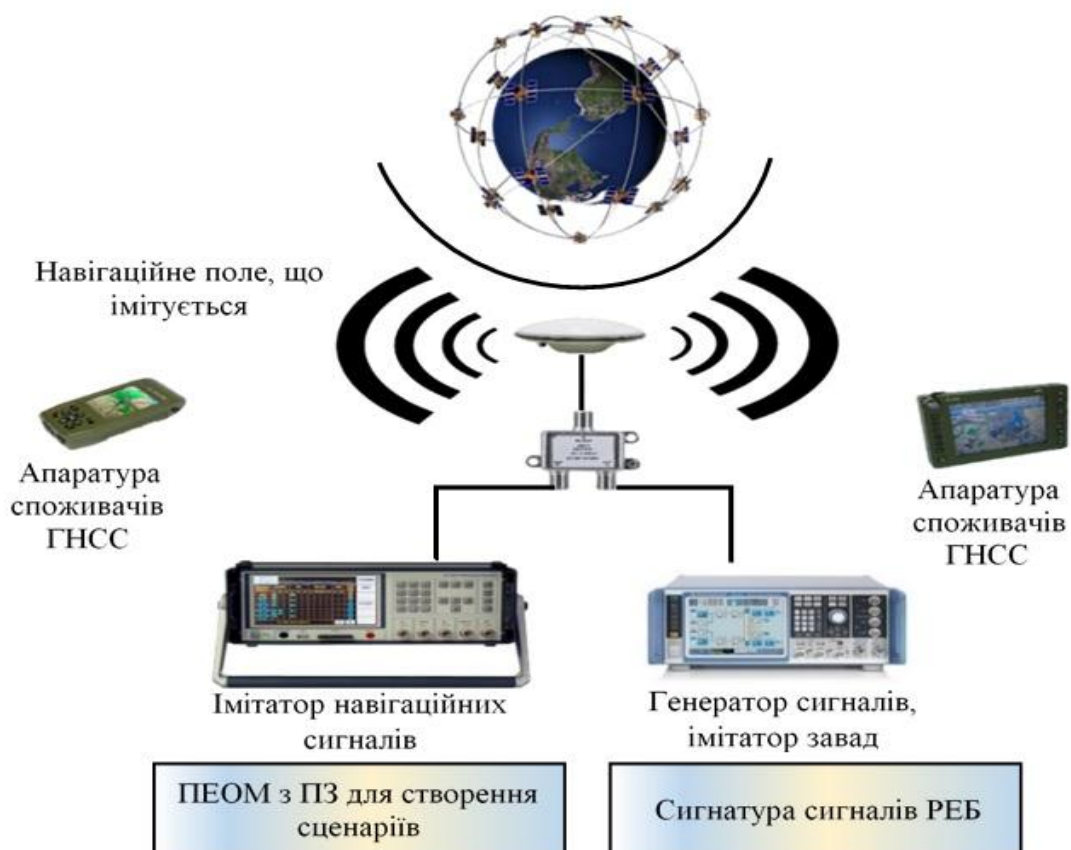


Рис.1. Схема випробування за допомогою імітатора навігаційних сигналів

Схема випробувального стенду, основним елементом якого є імітатор СН-3810 [7], представлена на рисунку 2. Такий стенд дозволяє в лабораторних умовах визначати технічні параметри апаратури споживачів ГНСС, імітувати рух різних об'єктів: автомобіля, літака, ракети, корабля, парашутиста. Стенд дозволяє також записувати реальні навігаційні сигнали і багаторазово їх відтворювати.

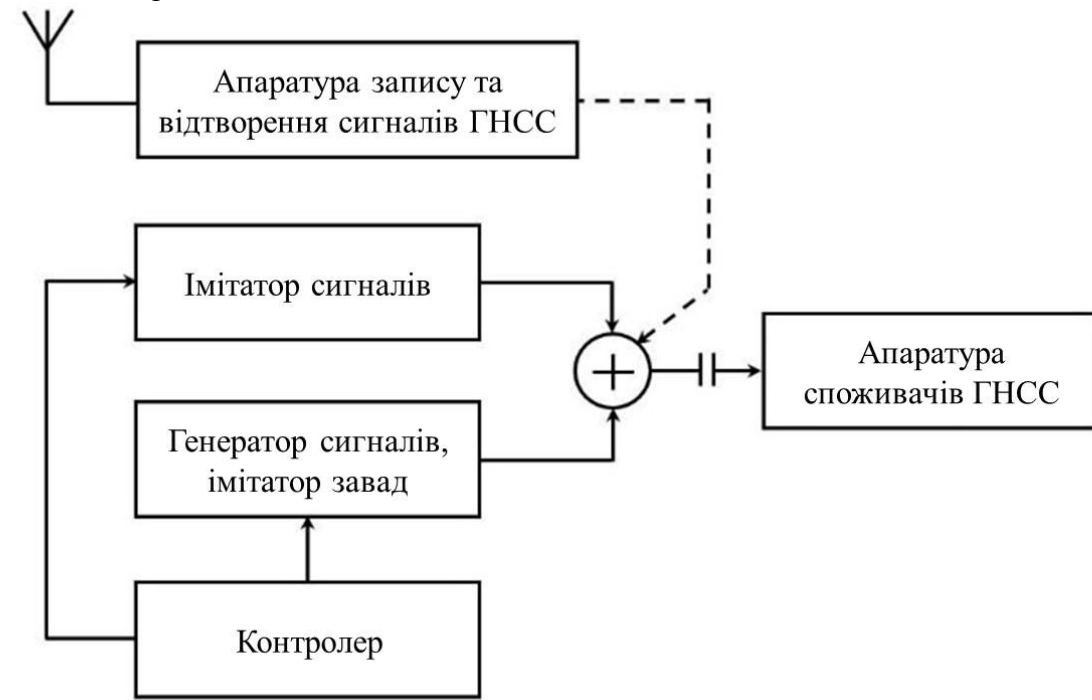


Рис.2. Схема випробувального стенду

Отже, для імітації навігаційного сигналу може застосовуватися методика, що містить кілька етапів, наведених нижче.

1. Визначається час початку і тривалість сценарію.
2. Задається файл з моделлю атмосфери. Для більшості задач достатньо файлу, що встановлено за замовчуванням. При необхідності можливо прибрати затримку сигналів в тропосфері або вибрати різні математичні моделі іоносфери.
3. Налаштовується угруповання космічних апаратів. Можливо налаштувати параметри кожного навігаційного супутника, задавати зміни потужності навігаційного сигналу в міру наближення або віддалення супутника від споживача. Потужність може бути постійною або змінюватися пропорційно квадрату відстані. Перед налаштуванням необхідно визначити тип сигналу антени (GPS, ГЛОНАСС) і частотний діапазон.
4. Створюється траєкторія руху об'єкта. Існує кілька стандартних траєкторій, що описують процес руху. Наприклад, рух по колу, по прямокутнику чи спіралі. Більш складні траєкторії створюються за допомогою команд, що представляють собою послідовність маневрів об'єкта.
5. Визначаються індивідуальні особливості об'єкта, на якому встановлена апаратура споживачів ГНСС, такі як максимальна швидкість, максимальне прискорення, максимальна висота польоту.
6. Налаштовується наявність багатопроменевого поширення сигналів та задається діаграма направленості антени (Рис.3).

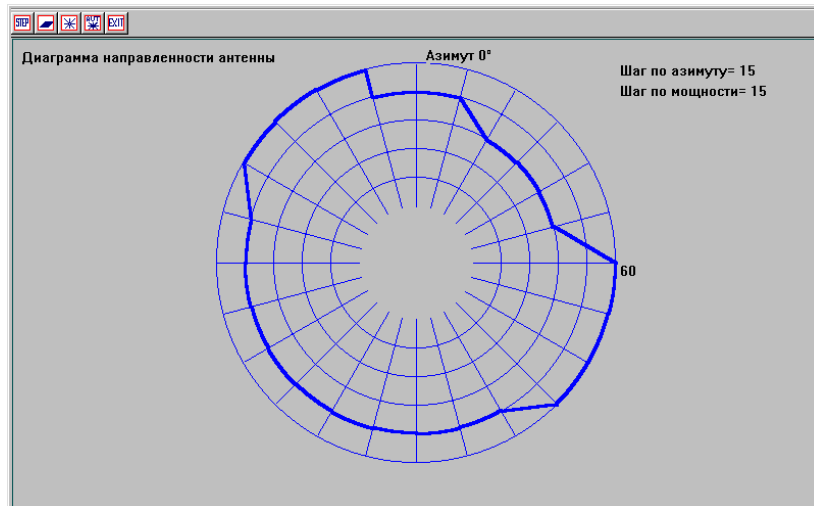


Рис.3. Діаграма направленості антени

7. Задаються потужності навігаційних сигналів від супутників.

На наступному етапі одним із завдань є оцінка точності визначення координат і швидкості апаратури споживачів ГНСС.

З цією метою імітатор навігаційних сигналів генерує сигнали систем GPS і ГЛОНАСС на частоті L1.

Експеримент проводиться у декілька етапів:

1. створюється сценарій руху по заданій траєкторії. Для цього задається точка старту, початкова швидкість і напрямок. Далі змінюється швидкість, напрямок руху і висота;

2. запускається імітація навігаційних сигналів. На виході імітатора генерується навігаційне поле;

3. апаратура споживачів ГНСС приймає імітовані сигнали навігаційних супутників, вирішує навігаційну задачу і виводить дані на персональний комп'ютер;

4. координати і значення швидкості, виміряні за допомогою апаратури споживачів ГНСС, зберігаються у вигляді таблиць;

5. обчислюється середнє відхилення координат імітованої траєкторії і отриманих від апаратури споживачів ГНСС з вихідними траєкторіями руху за формулою:

$$X_{\text{пом}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2}{n}},$$

де  $X_{\text{пом}}$  – середня помилка вимірювання координат, отриманих від апаратури споживачів ГНСС;  $x_i$  – значення координати, отриманої від апаратури споживачів ГНСС;  $x_i^*$  – координата вихідної траєкторії руху;  $n$  – кількість вимірів;

$$V_{\text{пом}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_i^*)^2}{n}},$$

де  $V_{\text{пом}}$  – середня помилка вимірювання швидкості, отриманих від апаратури споживачів ГНСС;  $V_i$  – швидкості, отриманої від апаратури споживачів ГНСС;  $V_i^*$  – значення реальної швидкості руху;  $n$  – кількість вимірів.

Наступним завданням є оцінка завадозахищеності апаратури споживачів ГНСС. Завади на вході апаратури споживачів ГНСС можуть бути як природного, так і штучного походження. Оскільки рівень навігаційних сигналів на вході апаратури споживачів ГНСС дуже низький, то навіть порівняно малопотужні джерела завад можуть чинити істотний вплив на роботу навігаційного приймача. В опублікованій літературі зазначається, що при

використанні С / А коду GPS для пошуку і входження в режим стеження порогове відношення завада / сигнал становить 22 дБ [8-9]. Граничне відношення завада / сигнал для зриву стеження дещо більше. У режимі спостереження збільшення рівня завади до порогового погіршує точність визначення координат, але зберігає робочий стан приймача. Перевищення порогового відношення призводить до зриву супроводження сигналів і блокування приймача.

Тестування навігаційної апаратури GPS і ГЛОНАСС на стійкість до завад здійснюється з використанням випробувального стенду, схема якого наведена на рисунку 4.

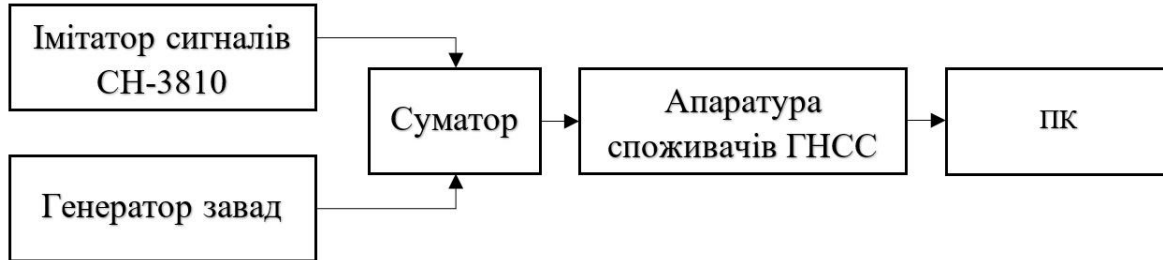


Рис.4. Схема випробувального стенду

Тестування роботи апаратури споживачів ГНСС здійснюється окремо системами GPS і ГЛОНАСС. Для навігаційних приймачів систем GPS порогові значення рівня гармонійних завад представлені в табл. 2. При цьому під граничним значенням розуміється максимальне значення потужності завади, при якому навігаційний приймач ще може визначати координати і швидкість споживача ГНСС. Це значення істотно залежить від частоти завади.

Таблиця 2

Граничні значення гармонійних завад при роботі з сигналами GPS

Частота, МГц	Порогові значення рівня завад, дБВт
$F < 1529$	-55
$1529 < F < 1565$	від - 55 до - 136
$1565 < F < 1585$	-136
$1565 < F < 1607,5$	від - 136 до - 75
$1607,5 < F < 1640$	від - 75 до - 55
$F > 1640$	-55

Для навігаційних приймачів систем ГЛОНАСС порогові значення рівня гармонійних завад представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Граничні значення гармонійних завад при роботі з сигналами ГЛОНАСС

Частота, МГц	Порогові значення рівня завад, дБВт
$1578 < F < 1593$	від - 80 до - 136
$1593 < F < 1609$	-136
$1609 < F < 1620$	від - 136 до - 80
$1620 < F < 1635$	від - 80 до - 55
$F > 1635$	-55

Для якісної оцінки завадозахищеності апаратури споживачів ГНСС рекомендується наступна методика.

1. Запускається імітація навігаційного сигналу однієї з систем GPS або ГЛОНАСС за описаним вище алгоритмом.
2. Очікується перехід апаратури споживачів ГНСС в режим стеження за навігаційними сигналами.
3. Задається вид, несуча частота і потужність завади і починається її генерація. З цією метою використовується генератор типу Agilent N5272, який дозволяє створювати

висоочастотні коливання без модуляції і з амплітудною, частотною або фазовою модуляцією.

4. Оцінка впливу завади ведеться за графіком залежності похибки вимірювання координат від часу.

5. З отриманого графіка фіксується значення похибки вимірювання координат, відповідно до встановленого режиму.

6. Змінюється рівень потужності завади і визначається похибка вимірювання координат приймача апаратури споживачів ГНСС. Таким чином, визначається характеристика супроводження приймача при наявності завади на вході.

7. В результаті знаходиться значення порогового відношення завада/сигнал по потужності, при якому відбувається зрив стеження за сигналами від навігаційних супутників.

Кількісно завадозахищеність оцінюється коефіцієнтом придушення, чисельно рівного максимальному відношенню завада/сигнал, при якому апаратура споживачів ГНСС ще визначає свої координати.

**Висновки та перспективи розвитку.** Таким чином, у статті запропоновано методичний підхід щодо організації проведення випробувань апаратури споживачів ГНСС, який полягає в наступному: розробка варіантів використання обладнання з використанням імітатора навігаційних сигналів; методика оцінки точності визначення координат і швидкості, а також завадозахищеності апаратури споживачів ГНСС. Використання запропонованого методичного апаратури дозволить підвищити ефективність проведення випробувань апаратури споживачів ГНСС.

Для якісного проведення випробувань апаратури споживачів супутникових навігаційних систем в якості джерела сигналів доцільно застосовувати імітатор навігаційних сигналів та апаратуру генерації сигналів широкого спектру, що дозволяє отримати інформацію про істинно прийняті параметри сигналів та полегшує інтерпретацію результатів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. J. B. S. Teasley, Summary of the initial GPS Test Standards Document: ION STD-101, in Proc. of 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Palm Springs, CA, Sep. 1995, P. 1645–1653.

2. Institute of Navigation, ION STD 101 recommended test procedures for GPS receivers. Revision C, Manassas, VA, 1997.

3. Корнилов И.Н. Тестирование навигационной аппаратуры потребителя GPS/ГЛОНАСС. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2017.

4. ETSI EN 303 413 v1.1.1 (2017-06) Satellite Earth Stations and Systems (SES); Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers; Radio equipment operating in the 1 164 MHz to 1 300 MHz and 1 559 MHz to 1 610 MHz frequency bands; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.etsi.org>. – 2017.

5. ETSI TR 103 183 v1.1.1 (2012-10) Satellite Earth Stations and Systems (SES); Global Navigation Satellite Systems (GNSS) based applications and standardisation needs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.etsi.org>. – 2012.

6. ANP-5 Edition 1 (The NATO Guideline for GNSS User Equipment Standardized Field Test Scenarios) is a NATO UNCLASSIFIED publication. It shall be transported, stored and safeguarded in accordance with agreed security regulations for the handling of NATO UNCLASSIFIED documents. – NATO HQ, 2010 – 37 с.

7. Специализированное программное обеспечение рабочей станции (среда создания сценария): руководство оператора. – ТДЦК.80025-02 34 01. – Смiла: КБ “Центр”. – 132 с.

8. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования; под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

9. Перов А.И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2012. – 240 с

**Стригун Віталій Васильович**

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3483-1315>  
+380933545770

**Барвінок Руслан Дмитрович**

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-0744-5737>  
+380933170895

**Білоус Олег Володимирович**

науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>  
+380939191013

**Толмачов В'ячеслав Юрійович**

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3927-2041>  
+380933394231

**Vitaliy Strihun**

Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3483-1315>  
+380933545770

**Ruslan Barvinok**

Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0744-5737>  
+380933170895

**Oleh Bilous**

Researcher of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>  
+380939191013

**Vyacheslav Tolmachov**

Senior Researcher of Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3927-2041>  
+380933394231

**IMPROVEMENT OF METHODS FOR TESTING OF NAVIGATION USER EQUIPMENT OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS USING A NAVIGATION SIGNAL SIMULATOR**

**V Stryhun, R Barvinok and O Bilous**

*Satellite navigation technologies are widely used around the world. Existing systems are constantly being upgraded, new satellites are being launched, satellite signals are being improved, military signals that are more resistant to interference are being gated in, ground-based navigation systems are being deployed, and the characteristics of GNSS user equipment are being improved.*

*The effectiveness of GNSS user equipment is influenced by many different factors - from its internal circuit to the signal transmission medium where it is used. Testing of GNSS equipment consists in characterization of system performance and ensuring that manufacturer quality standards are met and expectations of the end user are satisfied. The solution of problems related to the testing of GNSS user equipment is the use of such equipment as simulators, GNSS signal recording and reproduction equipment, broad spectrum signal generation equipment, software for testing GNSS user equipment in laboratory conditions. The abovementioned equipment makes it possible to fully automate the test process by repeatedly performing user-defined scenarios.*

*The use of signal generators for GNSS simulation has advantages over the use of a live GNSS signal. When using live signals the test conditions change constantly and unpredictably, therefore it is unlikely that two identical sequential tests will be performed under the same conditions. Retest is the most important requirement for the test process.*

*The article deals with methods improvement and proposes the choice for rational equipment composition for GNSS user testing equipment.*

**Keywords:** *global navigation satellite systems, satellite navigation, user equipment, testing of armament and military equipment, methodologies of testing, assessment methods for accuracy of coordinate finding.*