

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

KHARKIV NATIONAL  
UNIVERSITY OF RADIO ELECTRONICS

## **RADIOTEKHNIKA**

**All-Ukrainian  
interdepartmental scientific and technical collection**

ISSN 0485-8972  
eISSN 2786-5525

Founded in 1965

I S S U E 2 1 3

Kharkiv  
Kharkiv National  
University of Radio Electronics  
2023

## UDC 621.3

The collection is included in the List of scientific professional publications of Ukraine, category «Б», technical and physical-mathematical sciences (approved by orders of the Ministry of Education and Science from 17.03.2020 № 409; from 02.07.2020 № 886; from 24.09.2020 № 1188) by specialties: 171 – Electronics; 172 – Telecommunications and Radio Engineering; 173 – Avionics; 125 – Cybersecurity; 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies; 152 – Metrology and Information-Measuring Equipment; 153 – Micro- and Nanosystem Technology; 163 – Biomedical Engineering; 105 – Applied Physics and Nanomaterials.

Website: [rt.nure.ua](http://rt.nure.ua)

Registration certificate KV № 12098-969 PR dated 14. 12. 2006.

The authors are responsible for the content of the article.

## Editorial Team

I.V. Svyd, *PhD, Assoc. prof.*, NURE, Ukraine (Chief Editor)  
O.G. Avrunin, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
D.V. Ageiev, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
V.M. Bezruk, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
I.M. Bondarenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, NURE, Ukraine  
I.D. Gorbenko, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, KhNU V. N. Karazin, Ukraine  
D.V. Gretsikh, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. prof.*, NURE, Ukraine  
K.Yu. Dergachov, *PhD, Senior Researcher, Sciences, prof.*, NAU «KhAI», Ukraine  
V.O. Doroshenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, NURE, Ukraine  
I.P. Zakharov, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
V.M. Kartashov, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
O.O. Konovalenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, Academician of NASU, IRA NASU, Ukraine  
A.S. Kulik, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NAU «KhAI», Ukraine  
L.M. Lytvynenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, Academician of NASU, IRA NASU, Ukraine  
A.I. Luchaninov, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, NURE, Ukraine  
K.M. Muzyka, *Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher*, NURE, Ukraine  
E.M. Odarenko, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
O.G. Pashchenko, *PhD, Assoc. prof.*, NURE, Ukraine  
V.V. Semenets, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
S.I. Tarapov, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, member-cor. NASU, IRE NASU, Ukraine  
P.L. Tokarsky, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, IRA NASU, Ukraine  
O.I. Filipenko, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
H.Z. Khalimov, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine  
O.M. Tsymbal, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. prof.*, NURE, Ukraine  
O.I. Tsopa, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine

## Members of the editorial board of foreign scientific institutions and educational institutions

Boris Chichkov (*Germany*), Marianna Ivashina (*Sweden*), Konstyantyn Markov (*Germany*), Georgiy Sevskiy (*Germany*), Larysa Titarenko (*Poland*), Vitaliy Zhurbenko (*Denmark*), Irena Vorgul (*United Kingdom*), Waldemar Wójcik (*Польша*).

Responsible for the issue: *I.V. Svyd, PhD, Assoc. prof., I.D. Gorbenko, Dr. Sc. (Tech.), prof.*

Technical Secretary: *O.S. Polyakova.*

Recommended by the Scientific and Technical Council of Kharkiv National University of Radio Electronics, protocol № 5 dated 16.06.2023.

Address of the editorial board: Kharkiv National University of Radio Electronics (NURE), ave. Nauky, 14, Kharkiv, 61166, tel. (0572) 7021-397.

The use of materials is possible only with the consent of the editorial board.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

## **РАДІОТЕХНІКА**

**Всеукраїнський  
міжвідомчий науково-технічний збірник**

ISSN 0485-8972  
eISSN 2786-5525

Засновано в 1965 р.

**В И П У С К 2 1 3**

Харків  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки  
2023

## УДК 621.3

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія "Б", технічні та фізико-математичні науки (затверджено наказами МОНУ від 17.03.2020 № 409; від 02.07.2020 № 886; від 24.09.2020 № 1188) за спеціальностями: 171 – Електроніка; 172 – Телекомунікації та радіотехніка; 173 – Авіоніка; 125 – Кібербезпека; 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка; 153 – Мікро- та наносистемна техніка; 163 – Біомедична інженерія; 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Сайт: [rt.nure.ua](http://rt.nure.ua)

Регістраційне свідоцтво КВ № 12098-969 ПР від 14. 12. 2006.

За зміст статті відповідальні автори.

### Редакційна колегія

І.В. Свид, *к.т.н., доц., ХНУРЕ, Україна (головний редактор)*  
О.Г. Аврунін, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
Д.В. Агеев, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
В.М. Безрук, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
І.М. Бондаренко, *д.ф.-м.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
І.Д. Горбенко, *д.т.н., проф., ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Україна*  
Д.В. Грецьких, *д.т.н., доц., ХНУРЕ, Україна*  
К.Ю. Дергачов, *к.т.н., с.н.с., НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна*  
В.О. Дорошенко, *д.ф.-м.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
І.П. Захаров, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
В.М. Карташов, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
А.А. Коноваленко, *д.ф.-м.н., академік НАНУ, РІАН, Україна*  
А.С. Кулік, *д.т.н., проф., НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна*  
Л.М. Литвиненко, *д.ф.-м.н., академік НАНУ, РІАН, Україна*  
А.І. Лучанінов, *д.ф.-м.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
К.М. Музика, *д.т.н., с.н.с., ХНУРЕ, Україна*  
Є.М. Одаренко, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
О.Г. Пащенко, *к.ф.-м.н., доц., ХНУРЕ, Україна*  
В.В. Семенець, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
С.І. Тарапов, *д.ф.-м.н., проф., член-кор. НАНУ, ІРЕ НАНУ, Україна*  
П.Л. Токарський, *д.ф.-м.н., проф., РІАН, Україна*  
О.І. Філіпенко, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
Г.З. Халімов, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*  
О.М. Цимбал, *д.т.н., доц., ХНУРЕ, Україна*  
О.І. Цопа, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*

### Міжнародна редакційна колегія

Boris Chichkov (*Німеччина*), Marianna Ivashina (*Швеція*), Konstyantyn Markov (*Німеччина*),  
Georgiy Sevskiy (*Німеччина*), Larysa Titarenko (*Польща*), Vitaliy Zhurbenko (*Данія*),  
Irena Vorgul (*United Kingdom*), Waldemar Wójcik (*Польща*).

Відповідальні за випуск: *І.В. Свид, канд. техн. наук, доц., І.Д. Горбенко, д-р техн. наук, проф.*

Технічний секретар: *О.С. Полякова.*

Рекомендовано Науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки, протокол № 5 від 16.06. 2023.

Адреса редакційної колегії: Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), просп. Науки, 14, Харків, 61166, тел. (0572) 7021-397.

Використання матеріалів можливе лише за згодою редколегії.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS  
**RADIOTEKHNIKA**  
Issue 213  
In English and Ukrainian

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
**РАДІОТЕХНІКА**  
Випуск 213  
Англійською та українською мовами

*Коректор Л.І. Сащенко*

Підп. до друку 30.06.2023. Формат 60x90/8. Папір офсет. Гарнітура Таймс. Друк. ризограф.  
Ум. друк. арк. 10,9. Обл.-вид. арк. 8,0. Тираж 300 прим. Зам. № 547. Ціна договір.

Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ)  
Просп. Науки, 14, Харків, 61166.

Оригінал-макет підготовлено і збірник надруковано у ПФ „Колегіум”, тел. (057) 703-53-74.  
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої діяльності до Державного реєстру видавців.  
Сер. ДК №1722 від 23.03.2004.