



**Бойко Юлій Миколайович**  
професор кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних технологій  
факультету інформаційних технологій  
Хмельницького національного університету,  
доктор технічних наук, професор



**Полікарівських Олексій Ілліч**  
професор кафедри технічної кібернетики  
й інформаційних технологій ім. проф. Р. В. Меркта  
навчально-наукового інституту інформаційних  
технологій та інноваційного підприємництва  
Одеського національного морського університету,  
доктор технічних наук, професор



**Ткачук Віталій Павлович**  
завідувач кафедри технології машино-  
будування факультету інженерії,  
транспорту та архітектури  
Хмельницького національного університету,  
кандидат технічних наук, доцент



**Карпова Леся Вікторівна**  
доцент кафедри телекомунікацій, медійних  
та інтелектуальних технологій  
факультету інформаційних технологій  
Хмельницького національного університету,  
кандидат технічних наук, доцент

ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ, ПРИЙМАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Бойко Ю.М., Полікарівських О.І., Ткачук В.П., Карпова Л.В.

# ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ, ПРИЙМАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ



Бойко Ю. М., Полікаровських О. І.,  
Ткачук В. П., Карпова Л. В.

---

**ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ  
СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ,  
ПРИЙМАННЯ ТА ОБРОБКИ  
ІНФОРМАЦІЇ**

---

МОНОГРАФІЯ

Хмельницький 2023

УДК 004.4  
Б77

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Хмельницького національного університету,  
протокол № 14 від 29.06.2023*

**Рецензенти:**

- Туровський О. Л.** – д-р техн. наук, проф.,  
проф. кафедри засобів захисту інформації,  
Національний авіаційний університет (м. Київ);
- Рачок Р. В.** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри  
зв'язку та інформаційних систем, Національна академія  
Державної прикордонної служби України  
імені Богдана Хмельницького;
- Манзюк Е. А.** – д-р техн. наук, доц., проф. кафедри комп'ютерних наук,  
Хмельницький національний університет

*Матеріали подані в авторській редакції*

**Б77 Бойко Ю. М., Полікаровських О. І.,  
Ткачук В. П., Карпова Л. В.**

Програмно-конфігуровані системи передавання, приймання та обробки інформації : монографія / Ю. М. Бойко, О. І. Полікаровських, В. П. Ткачук, Л. В. Карпова. Хмельницький : ХНУ, 2023. 317 с.

ISBN 978-966-330-424-3

Наведено теоретико-прикладні аспекти розробки пристроїв передавання, приймання та оброблення сигналів у програмно-конфігурованих радіосистемах. Розглянуто концептуальні засади побудови функціональних схем радіоапаратури та принципи роботи компонентів апаратної частини цих систем. Проаналізовано прикладні напрями їх застосування у складі перспективних систем електронних комунікацій та радіотехніки.

Для фахівців, науковців, викладачів, аспірантів і студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

**УДК 004.4**

ISBN 978-966-330-424-3

© Бойко Ю. М., Полікаровських О. І.,  
Ткачук В. П., Карпова Л. В., 2023  
© ХНУ, оригінал-макет, 2023

## ВИСНОВКИ

---

Результатом досліджень представлених в роботі є розробка комплексу науково-обґрунтованих теоретичних та практичних положень, а також практичних рекомендацій і пропозицій щодо перспективних трендів розвитку радіообладнання на основі концепції ПКР. В роботі розглянуто принципи побудови, класифікація і основні характеристики радіосистеми ПКР.

Систематизовано узагальнені з літературних джерел, довідників і стандартів актуальні відомості щодо особливостей організації радіосистем ПКР, передачі сигналів з різною формою сигнально-кодових конструкцій, типу модуляції, конструкції приймальної та передавальної частини каналу зв'язку в умовах завод та спотворень різноманітної специфіки.

У монографії викладено принципи схмотехнічного конструювання професіональних радіостанції ПКР, розглянуто їх основні технічні характеристики, систематизовано базові параметри на основі аналізу номенклатури провідних фірм світу. Аналізуються різноманітні варіанти застосування ПКР при реалізації зв'язку в складних заводських умовах, обговорюються отримані в результаті їх використання переваги і проблемні моменти. Приведено характеристики для оцінки спотворень і перекручень сигналів в радіосистемах ПКР. Досліджено і проаналізовано способи та схмотехнічні рішення мінімізації спотворень та похибок, методики підвищення ефективності зв'язку, селективності приймання при використанні радіосистем на основі концепції ПКР. Приведено оновні характеристики і тенденції застосування ПКР у складі перспективних радіотехнічних систем.

Передбачається що робота буде корисною для широкого кола фахівців, студентів, аспірантів напрям діяльності яких охоплює прикладні питання забезпечення якості зв'язку сучасних електронних комунікацій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

---

1. Jayaweera S. K. *The Cognitive Radio* / S. K. Jayaweera. – New York : Wiley Telecom, 2015. – Pp. 27–41.
2. Fette B. *Cognitive Radio Technology* / B. Fette. – New York : Academic Press, 2009. – 848 p.
3. Pollin S. *Software Defined Radios* / S. Pollin, M. Timmers, L. Van der Perre. – Dordrecht : Springer, 2011. – 139 p.
4. Grayver E. *Implementing Software Defined Radio* / E. Grayver. – New York : Springer, 2013. – 267 p.
5. Arslan H. *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems* / H. Arslan. – Dordrecht : Springer, 2007. – 469 p.
6. Wright D. P. *Highly Portable, Low-Cost SDR Instrument for RF Propagation Studies* / D. P. Wright, E. A. Ball // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2020. – Vol. 69, no. 8. – P. 5446–5457.
7. Khan A. R. *Cooperative NOMA, Prototyping and Experimental Evaluation Using SDR* / A. R. Khan, S. Sohaib // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2021. – Vol. 70, no. 3. – P. 2872–2876.
8. Zhang P. *Design of Reconfigurable SDR Platform for Antenna Selection Aided MIMO Communication System* / P. Zhang, J. Xu, S. Zhong, H. Feng, L. Huang, T. Yuan, J. Zhang // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 169267–169280.
9. Hiari O. *A Reconfigurable SDR Transmitter Platform Architecture for Space Modulation MIMO Techniques* / O. Hiari, R. Mesleh // *IEEE Access*. – 2017. – Vol. 5. – P. 24214–24228.
10. Liu X. *Design and FPGA Implementation of a Reconfigurable 1024-Channel Channelization Architecture for SDR Application* / X. Liu, Z.-K. Wang, Q.-X. Deng // *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. – 2016. – Vol. 24, no. 7. – P. 2449–2461.
11. Pyatin I. S. *Synchronization of Communication Systems Based on SDR* / I. S. Pyatin, J. M. Boiko // *Proceedings of XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2022)*, (Vinnytsia, November 15–17, 2022). – Vinnytsia : VNTU, 2022. – P. 1–9.

12. Бойко Ю. М. Методика обробки та синхронізації сигналів у програмно-обумовлених радіосистемах з OFDM / Ю. М. Бойко, І. С. Пятін, І. Р. Пархомей // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 2. – С. 123–132.
13. Системи програмно-конфігурованого радіо як основа розвитку пеленгаційних радіотехнічних систем наступного покоління / О. Полікарровських, Ю. Бойко, В. Ткачук, В. Авдеев, О. Свістунов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2022. – № 1. – С. 27–35.
14. Mitola J. The software radio architecture / J. Mitola // IEEE Communications Magazine. – 1995. – Vol. 33, Iss. 5. – P. 26–38.
15. Belisle C. The software communications architecture: two decades of software radio technology innovation / C. Belisle, V. Kovarik, L. Pucker, M. Turner // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, Iss. 9. – P. 31–37.
16. Moy C. Software radio: a catalyst for wireless innovation / C. Moy, J. Palicot // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, Iss. 9. – P. 24–30.
17. Пятін І. С. Система зв'язку на базі програмно-керованого радіо / І. С. Пятін, Ю. М. Бойко // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення : тези V Всеукр. наук.-техн. конф., (Житомир, 1–2 груд. 2022 р.). – Житомир : Житомирська політехніка, 2022. – С. 231-232.
18. Wireless Innovation Forum. URL: <https://www.wirelessinnovation.org> (date of appeal: 30.03.2022).
19. GNU Radio. The Free & Open Soft Radio Ecosystem. URL: <https://www.gnuradio.org> (date of appeal: 30.03.2022).
20. Ettus Research. URL: <https://www.ettus.com> (date of appeal: 30.03.2022).
21. NooElec. URL: <https://www.nooelec.com/store/sdr.html> (date of appeal: 30.03.2022).
22. Bilén S. G. Software-Defined Radio: A New Paradigm for Integrated Curriculum Delivery / S. G. Bilén, A. M. Wyglinski, C. Anderson, T. Cooklev, C. B. Dietrich, B. Farhang-Boroujeny, et al. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, Iss. 5. – P. 184–193.
23. El-Hajjar M. Demonstrating the Practical Challenges of Wireless Communications Using USRP / M. El-Hajjar, Q. A. Nguyen, R. G. Maun-der, S. X. Ng // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, Iss. 5. – P. 184–193.
24. Petrova M. System-oriented communications engineering curriculum: teaching design concepts with SDR platforms / M. Petrova, A. Achtzehn, P. Mähönen // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, Iss. 5. – Pp. 202–209.

25. Stewart R. W. A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR / R. W. Stewart, L. Crockett, D. Atkinson, K. Barlee, D. Crawford, I. Chalmers, et al. // *IEEE Communications Magazine*. – 2015. – Vol. 53, Iss. 9. – P. 64–71.
26. Wyglinski A. M. Revolutionizing software defined radio: case studies in hardware, software, and education / A. M. Wyglinski, D. P. Orofino, M. N. Ettus, T. W. Rondeau // *IEEE Communications Magazine*. – 2016. – Vol. 54, Iss. 1. – P. 68–75.
27. Stewart R. W. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR / R. W. Stewart, K. W. Barlee, D. S. W. Atkinson, L. H. Crockett. – Glasgow : Strathclyde Academic Media, 2015.
28. Boiko J. M. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. M. Boiko, I. S. Pyatin, O. I. Eromenko, I. R. Parkhomye // *Адаптивні системи автоматичного управління*. – 2019. – № 1' (34). – С. 5–15.
29. Mitola J. SDR Architecture for US Tactical Radios / J. Mitola // *Software Radio*. – London : Springer, 2001.
30. Barreteau A. Case Study of Simulation and Performance Evaluation of a SDR Baseband Architecture / A. Barreteau, S. Le Nours, O. A. Pasquier // *Journal of Signal Processing Systems*. – 2013 – Vol. 73. – P. 267–279.
31. Chun A. Application of the Scalable Communications Core as an SDR Baseband. Computing Platforms for Software-Defined Radio / A. Chun, J. D. Hoffman. – Cham : Springer, 2017. – P. 123–145.
32. Boiko J. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate / J. Boiko, I. Pyatin, L. Karpova, O. Eromenko // *Data-Centric Business and Applications*. – Cham : Springer, 2021. – P. 79-103.
33. ETS 300 113. Radio Equipment and Systems (RES); Land mobile service; Technical characteristics and test conditions for radio equipment intended for the transmission of data (and speech) and having an antenna connector, 1996. URL: <http://surl.li/inbru> (date of appeal: 27.06.2023).
34. Boiko J. Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko // *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), (Lviv–Slavske, 22–26 February 2022)*. – Lviv–Slavske: IEEE, 2022. – P. 01–06.
35. Приймання та оброблення сигналів : навч. посіб. / О. М. Шинкарук, В. І. Правда, Ю. М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 365 с.
36. Boiko J. Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications / J. Boiko, V. Tolubko, O. Barabash,

О. Eromenko, Y. Havrylko // *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. – 2019. – Vol. 17. – № 4. – С. 2025–2038.

37. Дружинін В. А. Проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення : монографія / В. А. Дружинін. – Київ : Логос, 2013. – 230 с.

38. Методи та алгоритми обробки і захисту інформації в радіолокаційних системах із змінною просторовою конфігурацією : монографія / В. А. Дружинін, С. В. Толюпа, В. С. Наконечний, Н. В. Цьопа, С. В. Батрак. – Київ : Логос, 2014. – 251 с.

39. Sklar B. *Digital communications. Fundamentals and Applications* / B. Sklar. – New Jersey : Prentice Hall P T R, 2021. – 1011 p.

40. Основи функціонування багатоканальних систем передачі інформації : навч. посіб. / О. М. Шинкарук, Ю. М. Бойко, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 245 с.

41. Теорія і реалізаційні основи інваріантних п'єзореzonансних коливальних систем : монографія / Ф. Ф. Колпаков, С. К. Підченко ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – Харків : ХАІ, 2011. – 326 с.

42. Розвиток теорії та техніки цифрових обчислювальних синтезаторів : монографія / О. І. Полікаровських, І. В. Гула, Л. В. Карпова, Л. О. Ковтун. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 256 с.

43. Wang S-T. Software downloading in reconfigurable networks of open wireless architecture using SDR technology / Wang S-T, Wu J.-L. C., Hsu C.-Y., Ni W.-C. // *IEEE Communications Magazine*. – 2006. – Vol. 44, no. 10. – P. 128–134.

44. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с.

45. Boiko J. M. Synthesis problems of clock synchronization devices for receivers of satellite telecommunication data transmission systems / J. M. Boiko, A. I. Eromenko // *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Series – Radiotechnique. Radioapparatus building*. – 2014. – Ed. – 2014. – Т. 58. – С. 55–66.

46. Бойко Ю. М. Синтез і аналіз інформаційно-управляючих систем синхронізації засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // *Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. науч.-техн. зб. / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського»*. – Київ, 2017. – Вип. 1'(30). – С. 8–28.

47. Karimi-Ghartema M. PLL Structures for Single-Phase Applications / M. Karimi-Ghartema // *Enhanced Phase-Locked Loop Structures*

for Power and Energy Applications. – New York : Wiley-IEEE Press, 2014. – 232 p.

48. Talbot D. B. Digital PLL Example / D. B. Talbot // Frequency Acquisition Techniques for Phase Locked Loops. – New York : Wiley-IEEE Press, 2012. – P. 199–202.

49. Бойко Ю. Дослідження кіл синхронізації цифрових систем зв'язку / Ю. Бойко, І. Пятін, А. Мокрицький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 113–121.

50. Behzad R. Behavioral Representation for VCO and Detectors in PhaseLock Systems / R. Behzad // Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits: Theory and Design. – New York : Wiley-IEEE Press, 1996. – P. 274–277.

51. Бойко Ю. М. Особливості квазікогерентної обробки сигналів у засобах телекомунікацій з частотною маніпуляцією / Ю. М. Бойко, І. С. Пятін // Телекомунікаційні та інформаційні технології : наук. журн. / Держ. ун-т телекомунікацій. – Київ, 2018. – № 1 (58). – С. 27–39.

52. Pyatin I. Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio / I. Pyatin, J. Boiko // TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2023. – Vol. 21. – №. 3. – P. 496–505.

53. Makarenko A. Reducing the impact of interchannel interference on the efficiency of signal transmission in telecommunication systems of data transmission based on the OFDM signal / A. Makarenko, N. H. Qasim, O. Turovsky, N. Rudenko, K. Polonskyi and O. Govorun // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 1, no. 9. – P. 82–93.

54. Бойко Ю. Схемотехнічні аспекти забезпечення умов синхронізації в системах зв'язку з OFDM / Ю. Бойко, І. Пятін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – № 1. – С. 28–37.

55. Wang Y. Non-Data-Aided Feedforward Carrier Frequency Offset Estimators for QAM Constellations: A Nonlinear Least-Squares Approach / Y. Wang, K. Shi, E. Serpedin // EURASIP J. Adv. Signal Process. – 2004. – no. 8561392004.

56. Бойко Ю. М. Схемотехнічні особливості використання синтезаторів частот в приймальному тракті цифрових приймачів / Ю. М. Бойко, В. І. Стецюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 5. – С. 219–231.

57. Chenakin A. Frequency Synthesizers: Concept to Product / A. Chenakin. – Boston : Artech House Publishers, 2010. – 254 p.

58. Kihara M. Digital Clocks for Synchronization and Communications / M. Kihara. – Boston : Artech, 2002. – 274 p.

59. Munk B. A. Appendix B: Broadband Matching / B. A. Munk // *Finite Antenna Arrays and FSS*. – New York : Wiley-IEEE Press, 2003. – P. 288–305.
60. Modiri A. Efficient Design of Microstrip Antennas for SDR Applications Using Modified PSO Algorithm / A. Modiri, K. Kiasaleh // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2011. – Vol. 47, no. 5. – Pp. 1278–1281.
61. R&S®ADDx Single-Channel DF Antennas Product overview. URL: [<http://www.sekorm.com/doc/1094983.html>] (available: 03.11.2022).
62. Ibrahim A. A. Tunable Filtenna With DGS Loaded Resonators for a Cognitive Radio System Based on an SDR Transceiver / A. A. Ibrahim, H. A. Mohamed, A. R. D. Rizo, R. Parra-Michel, H. Aboushady // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 32123–32131.
63. Kim D. -C. Fully Digital Beamforming Receiver With a Real-Time Calibration for 5G Mobile Communication / D.-C. Kim, S.-J. Park, T.-W. Kim, L. Minz and S.-O. Park // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2019. – Vol. 67, no. 6. – P. 3809–3819.
64. Zhao J. Low profile ultra-wideband antennas for software defined radio / J. Zhao, C.-C. Chen and J. L. Volakis // *Proceedings of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, (Toronto, 11–17 July, 2010)*. – Toronto : IEEE, 2010. – P. 1–4.
65. Balanis C. A. Frequency-Independent Antennas: Spirals and Log-Periodics. *Modern Antenna Handbook* / C. A. Balanis. – New York : Wiley Telecom, 2008. – P. 263–323.
66. Бойко Ю. Н. Підвищення завадостійкості блоків оброблення сигналів супутникових засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації / Ю. Н. Бойко // *Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2015. – № 61. – С. 91–107.
67. Паламар М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. / М. Паламар, М. Стрембіцький, А. Паламар. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018. – 150 с.
68. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем : підручник / І. П. Бабак, С. В. Бабак, В. С. Єременко та ін. ; за ред. В. П. Бабака. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Київ : Ун-т новітніх технологій : НАУ, 2017. – 496 с.
69. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толпопа. – Київ : Логос, 2018. – 227 с.
70. National Semiconductor 5962-88752012A. URL: <http://surl.li/inzxcg> (date of appeal: 28.06.2026).

71. Analog Devices, Inc. URL: <http://surl.li/inzyl> (date of appeal: 28.06.2026).

72. Boiko J. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems / J. Boiko, O. Polikarovskyykh, V. Tkachuk, H. Yehoshyna, L. Karpova // *Mobile Computing and Sustainable Informatics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. – Singapore : Springer, 2023. – Vol 166.

73. Lee J-H. Multiple array spacings for an interferometer direction finder with high direction-finding accuracy in a wide range of frequencies / J-H. Lee, J-K. Kim, H-K. Ryu, Y-J. Park // *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*. – 2018. – Vol. 17, no. 4. – P. 563–566.

74. Li W. Stability and super-resolution of MUSIC and ESPRIT for multi-snapshot spectral estimation / W. Li, Z. Zhu, W. Gao, W. Liao // *IEEE Trans Signal Process*. – 2022. – No. 70. – P. 4555–4570.

75. Parhomey I. R. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar / I. R. Parhomey, J. M. Boiko, O. I. Eromenko // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2016. – Vol. 77, nr. 2. – P. 75–84.

76. Boiko J. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle / J. Boiko, O. Polikarovskyykh, V. Tkachuk // *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. – 2023. – Vol. 13. – №. 1. – P. 26–32.

## ЗМІСТ

---

Перелік умовних скорочень .....	3
Вступ.....	5

### Розділ 1. Функціональні архітектурні концепції програмно-конфігурованого радіо

1.1. Радіостанція програмно-конфігурованого радіо.....	12
1.1.1. Конфігурація радіостанції програмно-конфігурованого радіо .....	12
1.1.2. Параметри радіостанції програмно-конфігурованого радіо.....	18
1.1.3. Ідеальна радіостанція програмно-конфігурованого радіо .....	23
1.1.4. Перетворення спектра сигналу .....	26
1.1.5. Комбінаційні частоти у перетворенні спектра .....	43
1.1.6. Перетворення спектра зовнішніх шумів .....	49
1.2. Приймач програмно-конфігурованого радіо .....	53
1.2.1. Приймач з ненульовою проміжною частотою.....	54
1.2.2. Приймач з нульовою проміжною частотою .....	67
1.3. Передавач програмно-конфігурованого радіо .....	74
1.3.1. Передавач із ненульовою проміжною частотою .....	75
1.3.2. Передавач із нульовою проміжною частотою .....	81
1.3.3. Підсилювач потужності.....	87
1.4. Синтезатор частоти .....	99
1.5. Антено-фідерні пристрої.....	104
1.5.1. Широкосмугове узгодження антен.....	107
1.5.2. Частотно-незалежні антени .....	108
1.5.3. Дуплексний фільтр (антенний комутатор).....	112
1.6. Програмна підтримка обладнання радіоканалу ПКР.....	113
1.7. Радіостанції програмно-конфігурованого радіо .....	117
Висновки за розділом.....	118

### Розділ 2. Аналіз компонентної бази програмно-конфігурованого радіо

2.1. Комплексний фільтр.....	119
2.2. Поліфазний фільтр.....	123

2.3. Змішувач.....	127
2.3.1. Змішувач із придушенням дзеркальної частоти.....	128
2.3.2 Змішувач на гармоніках гетеродина.....	134
2.4. Квадратурний модулятор.....	136
2.4.1. Формування модульованого сигналу.....	137
2.4.2. Спотворення у квадратурному модуляторі.....	139
2.4.3. Оптимізація квадратурного модулятора.....	145
2.5. Квадратурний демодулятор.....	148
2.5.1. Типові квадратурні демодулятори.....	148
2.5.2. Квадратурний демодулятор для приймача з проміжною нульовою частотою.....	152
Висновки за розділом.....	159

### Розділ 3.

#### Методика цифрової обробки модульованого сигналу в системах програмно-конфігурованого радіо

3.1. Дискретизація безперервного сигналу.....	161
3.2. Квантування безперервного сигналу.....	167
3.3. Базова архітектура мікросхем АЦП.....	171
3.4. Цифро-аналоговий перетворювач.....	180
3.4.1. Загальні відомості.....	180
3.4.2. Параметри та архітектура ЦАП.....	183
Висновки за розділом.....	187

### Розділ 4.

#### Схемотехніка радіочастотних модулів програмно-конфігурованого радіо

4.1. Малошумний підсилювач та фільтр-преселектор.....	189
4.2. Синтезатор частот.....	195
4.2.1. Синтезатор із вузькою смугою пропускання ФАПЧ.....	195
4.2.2. Синтезатор із широкою смугою пропускання ФАПЧ.....	201
4.3. Лінеаризований підсилювач потужності.....	204
4.3.1. Нелінійність підсилювача потужності та достовірність прийому інформації.....	204
4.3.2. Підсилювач з лінеаризацією по огинаючій високочастотного модульованого сигналу.....	209
4.3.3. Передавач з попередніми передспотворенням в НЧ-діапазоні.....	217
4.3.4. Передавач з картезіанською петлею зворотного зв'язку.....	220
Висновки за розділом.....	233

### Розділ 5.

#### Аналіз завадостійкості приймача з нульовою проміжною частотою

5.1. Джерела постійної складової.....	235
5.2. Придушення постійної складової та фліккер-шумів.....	239

---

5.3. Моделювання приймача з нульовою проміжною частотою .....	249
5.3.1. Модель радіоканалу .....	249
5.3.2. Достовірність прийому .....	253
5.4. Оптимізація та програмне забезпечення приймача .....	270
5.4.1. Автоматичне регулювання підсилення .....	271
5.4.2. Корекція асиметрії каналів приймача .....	272
5.4.3. Оптимальний некогерентний частотний детектор .....	275
5.4.4. Оптимальний некогерентний фазовий детектор .....	278
5.4.5. Тактова синхронізація .....	280
Висновки за розділом .....	283

## Розділ 6.

### Прикладні аспекти застосування програмно-конфігурованого радіо в радіотехнічних системах

6.1. Концепції розвитку програмно-конфігурованого радіо .....	285
6.2. Рішення з відкритим кодом для прототипування ПКР .....	288
6.3. Вибір платформи ПКР на прикладі розробки пеленгаційної радіотехнічної системи .....	290
6.4. Класифікація методів пеленгування .....	292
6.5. Алгоритм кореляційно-інтерферометричного вимірювача .....	295
Висновки за розділом .....	303
<b>Висновки</b> .....	305
<b>Список використаних джерел</b> .....	306
<b>Додаток А</b> .....	313

Наукове видання

*Бойко Юлій Миколайович,  
Полікаровських Олексій Ілліч,  
Ткачук Віталій Павлович,  
Карпова Леся Вікторівна*

# ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ, ПРИЙМАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Відповідальний за випуск: **В. С. Яремчук**

Художнє оформлення обкладинки: **А. М. Басалюк**

Технічне редагування, коректування і верстка: **О. В. Чопенко**

Підписано до друку 09.08.2023.

Формат 30×42/2. Папір офс. Гарн. Times New Roman.

Друк різнографією. Ум. друк. арк. – 18,67. Обл.-вид. арк. – 14,87.

Тираж 50. Зам. № 77/23

---

Редакційно-видавничий відділ ХНУ.

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1.

Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.