

ФАЗОРІЗНИЦЕВА МОДУЛЯЦІЯ ВИСОКИХ ПОРЯДКІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЗНАЧЕНОЇ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ КАНАЛІВ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ 5-го ПОКОЛІННЯ

Для досягнення високої швидкості і вірності передачі інформації в статті запропоновано фазорізницеву модуляцію (ФРМ), яка забезпечує більш високі питому швидкість передачі інформації та завадостійкість. Розроблені адекватні алгоритми формування і обробки сигналів, які дозволяють досягнути інваріантності системи передачі інформації до змін фази і частоти сигналу. Розглянуті питання побудови модулятору сигналів з ФРМ другого та третього порядків. Запропонована технічна реалізація завадостійкого демодулятора, в якому здійснюється адаптивний вибіру когерентного або автокореляційного прийомів міліметрових радіохвиль.

Ключові слова: мобільний радіозв'язок, фазо-різницева модуляція, високошвидкісна радіолінія, завадостійкість, інваріантність, модулятор, демодулятор, генератор

Tolubko V. B., Berkman L. N., Kozelkov S. V., Horokhovskiy Ye. P. High order phase-difference modulation for providing certain resistance to interference of 5th generation mobile networks. Mobile networks efficiency depends on high speed and reliability of data transmission. Providing of channels resistance to interference will improve the quality of data transmission of 5th generation mobile networks. Phase-difference modulation (FDM), that provides higher speed of data transmission and resistance to interference, is offered in article for high speed and reliability of data transmission. Signal processing algorithms, that allow to achieve invariance of data transmission to changes of signal phase and frequency are developed. We consider construction of signals' modulators with second and third orders FDM signals. Technical implementation of demodulator with resistance to interference are proposed. Adaptive selection of coherent or autocorrelation receiving millimeter radio waves are made in that demodulator. Using this demodulator can significantly improve the reliability of wireless communication in turbulent troposphere in SWF wave range.

Keywords: mobile radio, phase-difference modulation, high speed radio link, resistance to interference, invariance, modulator, demodulator, generator

1. Вступ. Сучасні і перспективні системи мобільного радіо-зв'язку повинні мати можливість забезпечити весь спектр сучасних послуг, з високою якістю зв'язку і в той же час гарантувати сумісність з існуючими системами.

У системах цифрового радіо-зв'язку широко застосовуються сигнали з фазорізницевою модуляцією (ФРМ) [1, 2]. Ідеї ФРМ використані при розробці диференціальних методів передачі сигналів в системах багатоантенного радіозв'язку [3, 4]. Використання ФРМ значно розширює можливості систем цифрового зв'язку з фазомодульованими сигналами.

2. Теоретичні аспекти фазо-різницевої модуляції. Фазо-різницева модуляція є найбільш важливим у практичному відношенні частковим випадком різницевої модуляції [1, 3,]. Володіючи достоїнствами класичної фазової модуляції в області досягнення високої швидкості і вірності передачі інформації, ФРМ як різницева модуляція дозволяє досягнути інваріантності системи передачі інформації до змін фази і частоти сигналу. Останньою властивістю володіє і частотно-різнична модуляція (ЧРМ), однак за інших рівних умов ФРМ забезпечує більш високі питому швидкість передачі інформації та завадостійкість [5-7].

При ФРМ k -го порядку інформація вкладається в послідовність k -х різниць фаз несучого коливання, які можуть приймати кінцеве число значень: $\Delta^k \varphi_1, \Delta^k \varphi_2, \dots, \Delta^k \varphi_m$. Відповідна система називається m -позиційною системою з ФРМ k -го порядку, або при $m = 2^N$ – системою з N -кратною ФРМ k -го порядку. У N -кратних системах варіанти переданих k -х різниць фаз приймають значення $\Delta^k \varphi_i = \Delta^k \varphi_0 + (i-1)\pi / 2^{N-i}$ ($i = 1, 2, \dots, 2^N$), де $\Delta^k \varphi_0$ – початкове значення k -ї різниці фаз, яке обирається виходячи зі зручності реалізації операцій модуляції та демодуляції.

Вибір порядку ФРМ або ЧРМ у тій чи іншій системі визначається характером неадитивних дій, що приводять до нестабільності частоти і фази сигналу, і апіорними відомостями про ці дії [4, 6]. Розглянемо це питання докладніше.

Нехай сигнал-переносник має коливання виду:

$$S(t) = a \sin \psi(t). \quad (1)$$

Виділимо із аргументу даної тригонометричної функції лінійну складову $\omega_0 t$, яка не приводить до змін початкової фази в моменти, кратні тривалості посилки T , що, справедливо при $\omega_0 = 2\pi l / T$, де l – ціле число. Тоді різниця фаз $\psi(t) - \omega_0 t = \phi(t)$ буде характеризувати зміни початкової фази сигналу в зазначені моменти, а сигнал (1) можна представити як:

$$S(t) = a \sin[\omega_0 t + \phi(t)]. \quad (2)$$

При цифровій передачі повідомлень по каналах зв'язку фазомодульованими сигналами функція $\phi(t)$ відображає як інформацію, що передається, так і збурюючі дії. Останні називаються завадами, а також нелінійними і параметричними перетвореннями сигналу в каналі зв'язку. Ці перетворення, як правило, можна представити на кінцевому інтервалі поліноміальною моделлю з випадковими коефіцієнтами $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots$, що характеризують постійні, лінійні, квадратичні і т.д. зміни початкової фази сигналу:

$$\phi(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \phi_i t^i + \phi_u(t), \quad (3)$$

де ϕ_u – інформаційна фаза сигналу. Так як відхилення частоти сигналу ω від номінального значення ω_0 дорівнює похідній від (3), то:

$$\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} = \sum_{i=0}^{k-1} i\phi_i t^{i-1} + \omega_u(t), \quad (4)$$

де ω_u – інформаційне відхилення частоти сигналу.

З виразів (3) та (4) отримаємо: $\frac{d^k[\phi(t) - \phi_u(t)]}{dt^k} \equiv 0, \quad \frac{d^{k-1}[\omega(t) - \omega_u(t)]}{dt^{k-1}} \equiv 0,$

звідки у відповідності з доведеною вище властивістю інваріантності дискретно різницевого перетворення випливає, що k -і різниці фаз сигналу і $(k-1)$ -і різниці частоти не залежать від збурюючих дій, які описуються функцією (3).

Таким чином, якщо паразитна зміна фази сигналу на інтервалі тривалістю $(k+1)T$ можна представити у вигляді полінома $(k-1)$ -го порядку, то абсолютну інваріантність системи до цих змін може забезпечити ФРМ k -го порядку чи $(k-1)$ -го порядку.

Розглянемо найбільш характерні часткові випадки.

2.1. Невизначена, але незмінна початкова фаза сигналу:

$f(t) = f_u(t) + f_0; \quad \omega(t) = \omega_u(t)$. Ця ситуація виникає внаслідок некогерентності задаючих генераторів у лінії зв'язку або нестрокої когерентності сигналу та опорного коливання в демодуляторі (когерентність з точністю до дискретного зсуву). Так як у цьому випадку

$$\frac{d[\phi(t) - \phi_u(t)]}{dt} \equiv 0, \quad \omega(t) - \omega_u(t) \equiv 0,$$

то

$$\Delta^1 \phi = \Delta^1 \phi_u = in \text{ var } \phi_0, \quad \Delta^0 \omega = \omega_u = in \text{ var } \phi_0.$$

Це означає, що абсолютну інваріантність до постійних відхилень фази сигналу забезпечує ФРМ першого порядку і ЧРМ нульового (тобто ЧМ) порядку.

2.2. Невизначена і лінійно змінна початкова фаза (невизначена, але постійна частота сигналу): $\phi(t) = \phi_u(t) + \phi_0 + \phi_1 t; \quad \omega(t) = \omega_u(t) + \phi_1$. Ця ситуація виникає внаслідок нестабільності та нееталонності задаючих генераторів у лінії зв'язку та ефектом Доплера при зв'язку з рухомим чи нестационарним об'єктом із рівномірною у часі зміною відстані між передавачем і приймачем.

Так як у даному випадку:

$$d^2[\phi(t) - \phi_u(t)] / dt^2 \equiv 0; \quad d[\omega(t) - \omega_u(t)] / dt \equiv 0, \quad \text{то}$$

$$\Delta^2 \phi = \Delta^2 \phi_u = \text{in var}(\phi_0, \phi_1); \quad \Delta^1 \omega = \Delta^1 \omega_u = \text{in var}(\phi_0, \phi_1).$$

Це означає, що абсолютну інваріантність до лінійних відхилень фази сигналу може забезпечити ФРМ другого порядку і ЧРМ першого порядку.

2.3. Невизначена і квадратично змінна фаза сигналу (невизначена і лінійно змінна частота сигналу): $\phi(t) = \phi_u(t) + \phi_0 + \phi_1 t + \phi_2 t^2$; $\omega(t) = \omega_u(t) + \omega_1 + 2\omega_2 t$. Ця ситуація виникає внаслідок нестабільності задаючих генераторів у лінії зв'язку та через ефект Доплера при рівноприскореній зміні відстані між передавачем і приймачем. Так як у даному випадку

$$d^3[\phi(t) - \phi_u(t)] / dt^3 \equiv 0; \quad d^2[\omega(t) - \omega_u(t)] / dt^2 \equiv 0,$$

то

$$\Delta^3 \phi = \Delta^3 \phi_u = \text{in var}(\phi_0, \phi_1, \phi_2); \quad \Delta^2 \omega = \Delta^2 \omega_u = \text{in var}(\phi_0, \phi_1, \phi_2).$$

Це означає, що абсолютну інваріантність до квадратичних змін фази (лінійних відхилень частоти) сигналу можуть забезпечити ФРМ третього і ЧРМ другого порядку.

Деякі додаткові зауваження слід зробити з приводу умов і засобів досягнення інваріантності в розглянутих ситуаціях.

Щодо умов відзначимо, що апроксимаційна модель змін фази і частоти, яка задається співвідношеннями (3) і (4), повинна бути справедливою для інтервалів спостереження, тривалість яких дорівнює тривалості $k+1$ посилки сигналу. Якщо, наприклад, використовується ФРМ-1, то для досягнення абсолютної інваріантності до початкової фази остання повинна бути незмінною на інтервалі двох посилок. Якщо ж використовується ФРМ-2, то для досягнення абсолютної інваріантності до частоти несучого коливання ця частота повинна бути незмінною на інтервалі трьох посилок. Якщо зазначені умови не виконуються і випадкові зміни фази не виражаються точно через поліном $(k-1)$ -го ступеня на інтервалі $k+1$ посилки, то застосування ФРМ- k може забезпечувати лише відносну інваріантність до відповідних паразитних змін фази і частоти сигналу, тобто послабити, а не усунути вплив збурюючих дій. Ступінь такого ослаблення потрібно розраховувати для кожної конкретної ситуації окремо.

3. Схемна реалізація модуляторів/демодуляторів з ФРМ. Засобами досягнення інваріантності до змін частоти та фази сигналу є адекватні алгоритми формування (модуляції) і обробки (демодуляції) відповідних сигналів. Реалізація модуляторів у системах із ФРМ- k не містить ніяких принципових труднощів. Із загальних алгоритмів сигналів з ФРМ неважко одержати відповідні алгоритми для ФРМ- k .

Загальні схеми формування сигналів з різницевою модуляцією показані на рис.1,а, також містять вичерпну інформацію, необхідну для складання функціональних схем модуляторів сигналів із ФРМ- k . У якості прикладу на рис. 1. показані схеми модуляторів/демодуляторів сигналів із ФРМ-2 і ФРМ-3. Вони містять кодери, фазові модулятори/демодулятори (ФМ) і пристрої перетворення різниць фаз другого або третього порядку в значення поточної фази сигналу, які називають перекодовуючими пристроями (обведені штриховими лініями).

Більш складним є питання про реалізацію демодуляторів сигналів з ФРМ- k . Загальні схеми обробки сигналів з різницевою модуляцією (рис.1,б) містять вимірювач інформаційного параметра, алгоритм якого важко отримати в загальному вигляді [4, 8]. При ФРМ – це вимірювач-демодулятор сигналу, що будується по різному в залежності від апріорних відомостей про прийнятий сигнал і з врахуванням порядку обчислюваних надалі різниць фази. Так, при ФРМ-1, як відзначалося вище, властивість абсолютної інваріантності, стосовно невизначеної початкової фази сигналу, досягається за допомогою будь-якого некогерентного демодулятора сигналів із ФРМ-1, у тому числі за допомогою оптимального некогерентного й автокореляційного демодуляторів.

Алгоритми роботи і схеми таких демодуляторів детально розглянуті в [4, рис. 4.3, стор. 125, стор. 139], [8, рис. 21б, стор. 42] При ФРМ-2 властивість абсолютної інваріантості до частоти несучого коливання досягається тільки при використанні автокореляційних демодуляторів, що показано нижче.

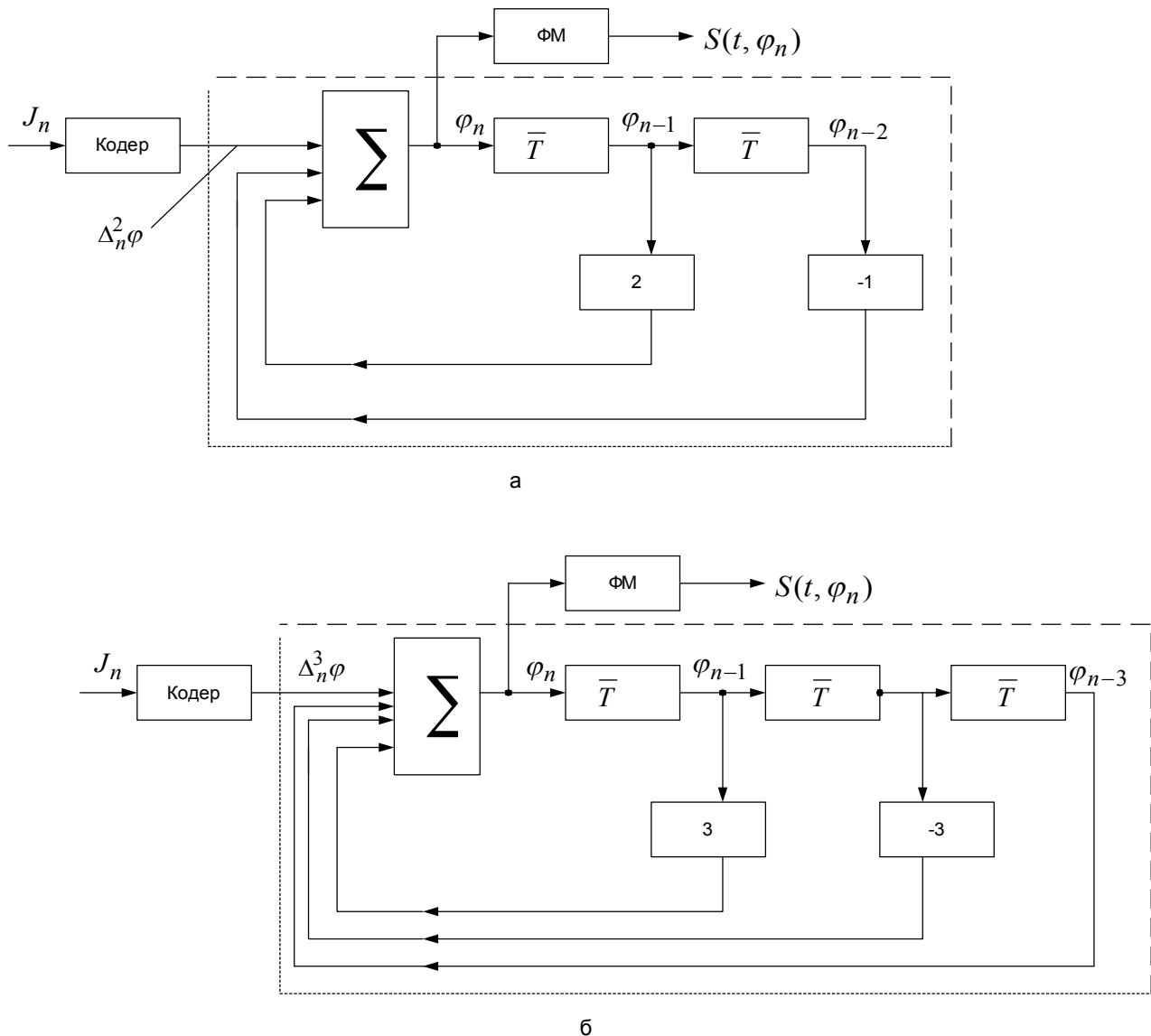


Рис.1. Модулятори/демодулятори сигналів з ФРМ другого (а) та третього (б) порядків

При ФРМ-3 автокореляційний демодулятор забезпечує тільки відносну інваріантність до лінійних змін частоти, а для досягнення абсолютної інваріантості потрібно синтезувати спеціальний недвовимірний вимірювач поточної фази сигналу. У загальному випадку вимірювач фази в системах із ФРМ високого порядку являє собою пристрій оптимального оцінювання фази сигналу при апріорних відомостях, які відповідають тій ступені невизначеності, яку дана система повинна подолати.

Порівняльна оцінка запропонованого пристрою (рис.1.б) з відомими розробками [4, 8] із врахуванням схемної реалізації окремих елементів, описаних в [9, рис. 5.6, стор. 108] і [10, рисунки 2.10, 11.8, 11.39, 17.2] приводиться нижче.

Середня ймовірність помилки для відомих рішень [4, 8] (прототипу) оцінюється як

$$P_{\text{ом пр}} = P_{\text{ом кор}} \approx \frac{0,409}{h_0^2}, \quad (5)$$

де h_0^2 – середнє значення квадрата відношення сигнал / шум.

Середня ймовірність помилки розглянутого пристрою

$$P_{\text{ом у}} = \frac{P_{\text{ом.ког}} \cdot T_1 + P_{\text{ом.авт}} \cdot T_2}{T_1 + T_2},$$

де T_1, T_2 – час роботи когерентного і автокореляційного режимів прийому;
 $P_{\text{ом авт}}$ – середня ймовірність помилки автокореляційного режиму прийому;

$$P_{\text{ом авт}} = \frac{1}{2 + 2 \cdot h_0^2}. \quad (6)$$

Завадостійкість запропонованого пристрою тоді буде $\Pi_y = \frac{1}{P_{\text{ом у}}}$, завадостійкість

прототипу – $\Pi_{\text{пр}} = \frac{1}{P_{\text{ом пр}}}$. Тоді при $T_1=T_2$

$$\frac{\Pi_y}{\Pi_{\text{пр}}} = \frac{2}{P_{\text{ом пр}} (P_{\text{ом ког}} + P_{\text{ом авт}})}. \quad (7)$$

Підставляючи в (7) числові значення (5) і (6) отримаємо:

$$\frac{\Pi_y}{\Pi_{\text{пр}}} \approx 1,3 \quad (\text{для ОФМ-2}); \quad \frac{\Pi_y}{\Pi_{\text{пр}}} \approx 1,5 \quad (\text{для ОФМ-4}).$$

Таким чином, завдяки адаптивного вибору когерентного або автокореляційного прийомів міліметрових радіохвиль підвищення завадостійкості в запропонованому демодуляторі в 1,3 рази для ОФМ-2 і в 1,5 рази для ОФМ-4 забезпечить відповідно вигравш $\sim 0,9 \div 1$ дБ для ОФМ-2 і $\sim 1,5 \div 1,7$ дБ для ОФМ-4.

Використання розглянутого у статті демодулятора дозволяє істотно підвищити надійність радіозв'язку в турбулентній тропосфері КВЧ діапазону хвиль, знизити витрати на організацію високошвидкісної радіолінії. У практичних схемах через частотно-селективні завмирання на трасі поширення міліметрових хвиль вигравш в завадостійкості в порівнянні з прототипом буде ще вища.

4. Висновки. Корисність запропонованого демодулятора полягає в тому, що вона дозволяє забезпечити надійний прийом сигналів НВЧ діапазону хвиль, що передаються по турбулентним тропосферним радіоканалам і, отже, може бути використана для вдосконалення широкого класу радіосистем передачі інформації по високошвидкісним цифровим КВЧ радіоканалам з підвищеною надійністю.

Список використаної літератури

1. Толубко В. Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5 G на базі фазорізничевої модуляції високих порядків / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков // Зв'язок. – 2016. – №4. – С. 5-7.
2. Толубко В. Б. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Орлов // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №4. – С. 3-8.
3. Козелков С. В. Метод визначення нелінійних передавальних функцій для радіоприймальних пристроїв на основі використання «нелінійних вхідних сигналів» / С. В. Козелков, С. М. Кучерук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2009, – № 4(22). – С. 35-37.
4. Окунев Ю. Б. Теория фазоразностной модуляции / Ю. Б. Окунев. – Москва : Связь, 1978.
5. Стеклов В. К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, Є. В. Кільчицький. – Київ : Техніка, 2004. – 576 с.
6. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – Київ : Техніка, 2002. – 848 с.

7. Стеклов В. К. Основы управления сетями та услугами телекоммуникаций / В. К. Стеклов, С. В. Кильчицкий. – Київ : Техніка, 2002. – 438 с.
8. Банкет В. Л. Системы восстановления несущей при когерентном приеме дискретных сигналов / В. Л. Банкет, А. М. Мельник // Зарубежная радиоэлектроника. – Москва. – 1983. – №12.
9. Мэндл М. 200 избранных схем электроники / М. Мэндл. – Москва : Мир, 1969.
10. Титце У. Полупроводниковая схемотехника ; пер. с нем. / У. Титце, К. Шелк. – Москва : Мир, 1982.

References

1. Tolubko V. B., Berkman L. N., Kozelkov S. V. Modelling of multiposition signal 5G technologies on phase-difference modulation of high orders // Zvyazok. – 2016. – №4. – PP. 5-7.
2. Tolubko V. B., Berkman L. N., Ye. V. Orlov. Multicriterion parameter optimization of software-defined networks // Telekomunykatytsiini ta informatsiini tekhnolohii. – 2014. – №4. – PP. 3-8.
3. Kozelkov S. V., Kucheruk S. M. Method of determining the non-linear transfer functions for radio receivers based on using «non-linear input signals» // Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh syl. – 2009. – № 4(22). – PP. 35-37.
4. Okuniev Yu. B. Theory of phase-difference modulation. – Moskva : Sviaz, 1978.
5. Steklov V. K., Berkman L. N., Kilchytskyi Ye. V. Optimization and modeling devices and communication system. – Kyiv : Tekhnika, 2004. – 576 p.
6. Steklov V. K., Berkman L. N. Telecommunication network engineering. – Kyiv : Tekhnika, 2002. – 848 p.
7. Steklov V. K., Kilchytskyi Ye. V. Management of telecommunications networks and services. – Kyiv : Tekhnika, 2002. – 438 p.
8. Banket V. L., Melnik A. M. Recovery systems of carrier when coherent receiving digital signals // Zarubezhnaia radioelektronika. – Moskva . – 1983. – №12.
9. Mendl M. 200 selected circuits of electronics. – Moskva : Mir, 1969.
10. Titce U., Shelk K. Semiconductors circuit design; transl. from German / U. Titce, K. Shelk. – Moskva : Mir, 1982.

Автор статті

Толубко Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, ректор Державного університету телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (44) 248 85 97. E-mail: v.tolubko@dut.edu.ua

Беркман Любов Наумівна – доктор технічних наук, професор, проректор з навчально-наукової роботи, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (50) 179 42 67. E-mail: l.berkman@dut.edu.ua

Козелков Сергій Вікторович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій та інформатизації, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (96) 017 31 80. E-mail: s.kozelkov@dut.edu.ua

Гороховський Євген Петрович – старший викладач кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (44) 249 25 83

Authors of the article

Tolubko Volodymyr Borysovych – sciences doctor (technic), professor, rector of the State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (44) 248 85 97. E-mail: v.tolubko@dut.edu.ua

Berkman Lyubov Naumivna – sciences doctor (technic), professor, vice-rector for educational-scientific work, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (50) 179 42 67. E-mail: l.berkman@dut.edu.ua

Kozelkov Serhiy Viktorovych – doctor of sciences (technical), director of the educational-scientific institute of telecommunications and informatization, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (96) 017 31 80. E-mail: s.kozelkov@dut.edu.ua

Horokhovskiy Yevhen Petrovych – associate professor of telecommunication system and network department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (44) 249 25 83

Рецензент:

доктор технічних наук, професор М. М. Климаш
Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Дата надходження

в редакцію: 25.01.2017 р.