

PANCHENKO SERHII VOLODYMYROVYCH¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
 LYSECHKO VOLODYMYR PETROVYCH², Doctor of Technical Sciences, Professor
 ZHUCHENKO OLEKSANDR SERHII OVYCH¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

INDYK SERHII VOLODYMYROVYCH¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

1 Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

2 Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine



Efficiency evaluation of a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators

Efficiency Evaluation of a Code Division Multiple Access System Based on a Multilevel Functional Model of Performance Indicators

The article considers the problem of evaluating the efficiency of a code division multiple access system that uses ensembles of unequal-energy complex signals. The purpose of the work is to develop an efficiency evaluation procedure for a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators with determination of the set of model levels sufficient for the stated task. The multilevel functional model is treated as a set of levels ordered by the degree of generalization of efficiency estimates. Each level is associated with functionals that determine the corresponding performance indicators. The model includes energy, structural, power-channel and system levels. The energy level is related to the energy composition of the signal ensemble, the structural level is related to mutual-correlation parameters of the signals, the power-channel level is related to the corresponding channel-level parameter, and the system level is related to the final estimate for the stated task. The full model keeps a sequential structure: the indicator of each upper level is determined through the indicator of the previous adjacent level and the parameters that enter the current level. This prevents the system-level indicator from being mixed with the reduced functional used for comparison of variants. The procedure uses functional reduction to determine which level functionals must take part in the reduced functional for a given finite set of compared variants. For each level under consideration, the procedure checks whether there is at least one pair of variants for which the value of the corresponding level functional differs. If all variants have the same value of a level functional, that level does not enter the reduced functional for the considered task. If at least one level satisfies the difference condition, the reduced functional is formed by the mapping that transforms the values of the sufficient level functionals into one numerical efficiency estimate for each variant. The obtained numerical estimates are then used to order the variants according to the selected type of task, minimization or maximization. The practical value of the result is that efficiency evaluation, synthesis or optimization of a code division multiple access system can be performed by the values of the reduced functional, while the full multilevel model remains sequential and the comparison uses only the set of levels that is sufficient for the stated task and the given set of variants.

Keywords: code division multiple access system; complex signal; performance indicator; multilevel functional model; functional reduction; reduced functional; energy level; structural level; power-channel level; system level.

Introduction.

Ultra-wideband transmission modes with impulse signals form a technical basis for energy-efficient wireless access devices with practically implemented high-frequency transmitting, receiving and processing paths in the 3.1–10.6 GHz and 57–71 GHz bands. The possibility of using impulse signals in such modes is defined by the IEEE 802.15.4 family of standards [1, 2]. For code division multiple access based on complex impulse signals, the key property of a signal ensemble is the ability to keep a low level of multiple-access interference for arbitrary time shifts between signals. In [3], ensembles of periodic impulse sequences were proposed that meet these requirements. However, the signals in such ensembles have different numbers of impulses and are therefore unequal in energy.

To evaluate unequal-energy ensembles, equivalent transformations were used in [4, 5]. These transformations connect the original ensemble with conditional equal-energy ensembles that are equivalent in total signal energy. This makes it possible to apply analytical relations developed for equal-energy ensembles of complex signals to unequal-energy ensembles and to use these relations in analysis, comparison and ranking tasks.

The obtained analytical relations make it possible to select, compare and rank ensembles by partial indicators. Efficiency evaluation of a code division multiple access system requires a transition from partial indicators to a generalized efficiency estimate of the system as a whole. For this purpose, a mathematical model is needed.

©PANCHENKO S. V., LYSECHKO V. P., ZHUCHENKO O. S., INDYK S. V., 2026

This model must define the set of indicators, their distribution by levels of consideration, the relations between indicators and the rule for obtaining the final estimate.

The analysis of publications [6–19] showed that mathematical models used to obtain the corresponding estimates or indicators are defined by the task, input data, application conditions and required result, and have common features: decomposition of a system or a task into elements, subsystems and relations between elements and subsystems; definition of functions of elements and subsystems; definition of inputs, outputs and states of elements or subsystems; definition of levels of a hierarchical structure, subtasks or functions; aggregation of partial results to obtain a system estimate; aggregation of elements and subsystems into the system as a whole; simplification of the task through decomposition, model reduction, reduction of task dimensionality, use of simpler models and replacement of level functions by their approximations. An approach to evaluating performance indicators of a code division multiple access system based on a multilevel functional model and using the theoretical apparatus of system and functional analysis [20–22] was considered in [23, 24]. The use of a multilevel functional model requires determination of the set of levels needed for the stated task of efficiency evaluation, synthesis or optimization. This leads to the need to determine the model levels whose functionals give different values for the compared variants and must take part in forming the estimate.

The purpose of the article is to develop an efficiency evaluation procedure for a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators with determination of the set of model levels sufficient for solving the stated task.

Discussion of the problem.

A multilevel functional model of performance indicators of a code division multiple access system is defined as a set of levels ordered by the degree of generalization of efficiency estimates. Each level is assigned functionals that determine the corresponding performance indicators. The considered multilevel functional model includes the energy, structural, power-channel and system levels. The functional relations of the multilevel model are determined by the following relations:

$$P_{EN} = F_{EN}((E_1, E_2, \dots, E_L), L),$$

$$P_{STR} = F_{STR}(P_{EN}, L, R_{max}^2),$$

$$P_{CHP} = F_{CHP}(P_{STR}, N),$$

$$P_{SYS} = F_{SYS}(P_{CHP}, C_{SYS}),$$

where P_{EN} , P_{STR} , P_{CHP} , P_{SYS} – performance indicators of the energy, structural, power-channel and system levels, respectively;

F_{EN} , F_{STR} , F_{CHP} , F_{SYS} – functionals of the energy, structural, power-channel and system levels, respectively;

L – ensemble size;

E_i – energy of the i -th signal of the ensemble,

$$i = 1, 2, \dots, L;$$

R_{max}^2 – maximum value, over the ensemble, of the squared cross-correlation;

N – parameter of the power-channel level determined by the communication channel model;

C_{SYS} – vector of parameters that directly enter the system level.

The energy level reflects the energy composition of the signal ensemble. The structural level reflects the correlation properties of the ensemble. The power-channel level takes into account the influence of the communication channel model. The system level gives the final estimate according to the stated task.

In practical use of the model, not every level necessarily affects the result of comparison of the variants. If the values of the functional of a certain level are the same for all compared variants, then this level does not affect their ordering. In this case, it is sufficient to use only those levels whose functionals give different values for at least one pair of variants.

Functional reduction of the set of model levels will mean the rule for forming a reduced functional by those levels whose functionals give different values for the compared variants. This rule does not change the sequential structure of the full four-level model. It only determines the set of levels whose functionals take part in the reduced numerical estimate for the stated task.

A functional formed by this rule will be called the reduced functional. The value of this functional is used as one numerical estimate for comparing and ranking the variants.

To determine the reduced functional, we introduce the mapping Φ_{red} , which transforms the values of the functionals of sufficient levels into one numerical efficiency estimate for comparing the variants. The reduced functional defines the comparison rule for the variants and does not change the sequential relations of the full four-level model.

Consider a finite set of variants of system construction, signal ensemble construction or parameter selection:

$$S = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(K)}\},$$

where S – set of compared variants;

$x^{(k)}$ – k -th variant, $k = 1, \dots, K$;

K – number of variants.

For the implementation of functional reduction, we specify the composition of each variant by levels:

$$x^{(k)} = (x_{EN}^{(k)}, x_{STR}^{(k)}, x_{CHP}^{(k)}),$$

$k = 1, \dots, K$,

where

$x_{EN}^{(k)}$ – set of parameters of the energy level for

the k -th variant;

$x_{STR}^{(k)}$ – set of parameters of the structural level

for the k -th variant;

$x_{CHP}^{(k)}$ – set of parameters of the power-channel

level for the k -th variant.

We introduce the functionals of the energy level F_{EN} , structural level F_{STR} and power-channel level F_{CHP} . The functional of the system level F_{SYS} determines the system-level indicator through the power-channel level indicator and the parameter vector of the system level.

For the levels whose functionals may enter the reduced functional, we introduce the set:

$$W = \{EN, STR, CHP\}.$$

The set of levels whose functionals enter the reduced functional is denoted by W_{red} . The set W_{red} includes the levels from W for which the value of the corresponding level functional differs for at least one pair of variants from the set S .

For an arbitrary level w from the set W , the corresponding level functional is denoted by F_w . The value $F_w(x)$ is the result of calculating the functional of level w for variant x . For a variant x , the value of the reduced functional is determined through the mapping Φ_{red} , whose argument is the set $(F_w(x))_{w \in W_{red}}$:

$$F_{red}(x) = \Phi_{red} \left((F_w(x))_{w \in W_{red}} \right),$$

where F_{red} – reduced functional;

$F_{red}(x)$ – value of the reduced functional for variant x ;

Φ_{red} – mapping whose argument is the set $(F_w(x))_{w \in W_{red}}$ and whose value is $F_{red}(x)$;

$F_w(x)$ – value of the functional of level w for variant x ;

W_{red} – set of levels whose functionals enter the reduced functional.

For each variant $x^{(k)}, k = 1, \dots, K$, we calculate the set of values $(F_w(x^{(k)}))_{w \in W_{red}}$.

Then, using the selected mapping Φ_{red} , we determine the value of the reduced functional $F_{red}(x^{(k)})$.

The algorithm of functional reduction of the set of levels of the multilevel functional model for a finite set of variants S includes the following steps.

Step 1. Define the initial data:

1) specify the set of compared variants:

$$S = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(K)}\},$$

where

S – set of compared variants;

$x^{(k)}$ – k -th variant;

K – number of variants.

2) specify the set of functionals of the levels that may enter the reduced functional: $\{F_{EN}, F_{STR}, F_{CHP}\}$;

3) specify the system-level indicator through the power-channel level indicator and the parameter vector of the system level:

$$P_{SYS} = F_{SYS}(P_{CHP}, C_{SYS}),$$

where

F_{SYS} – functional of the system level;

P_{CHP} – performance indicator of the power-channel level;

C_{SYS} – vector of parameters that directly enter the system level.

4) specify the set of levels whose functionals may enter the reduced functional:

$$W = \{EN, STR, CHP\},$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

where W - set of levels whose functionals may enter the reduced functional;

EN, STR, CHP - energy, structural and power-channel levels, respectively.

Step 2. For each level w from the set W , check whether the value of the corresponding functional can differ for at least one pair of compared variants:

1) for each $w \in W$, define the condition R_w :

$$R_w: \exists A, B \in \{1, \dots, K\}, A \neq B: F_w(x^{(A)}) \neq F_w(x^{(B)}),$$

where R_w - condition that determines the presence of a difference between values of the functional of level w ;

A, B - numbers of compared variants;

$F_w(x^{(A)}), F_w(x^{(B)})$ - values of the functional of level w for variants $x^{(A)}$ and $x^{(B)}$.

2) determine the set of levels W_{red} whose functionals enter F_{red} as the set of levels w from W for which the condition R_w is satisfied:

$$W_{red} = \{w \in W: R_w\};$$

3) complete the algorithm without defining F_{red} if the set W_{red} is empty:
 $W_{red} = \emptyset$.

Step 3. Define the reduced functional F_{red} through the mapping Φ_{red} for the case $W_{red} \neq \emptyset$:

$$F_{red}(x) = \Phi_{red} \left((F_w(x))_{w \in W_{red}} \right).$$

Step 4. For each variant number $k = 1, \dots, K$, calculate the set of values $(F_w(x^{(k)}))_{w \in W_{red}}$ and use the mapping Φ_{red} to

determine the value $F_{red}(x^{(k)})$:

$$F_{red}(x^{(k)}) = \Phi_{red} \left((F_w(x^{(k)}))_{w \in W_{red}} \right).$$

Step 5. Order the variants by the values $F_{red}(x^{(k)}), k = 1, \dots, K$:

1) specify the task type:

$opt \in \{\min, \max\}$, where opt - task type: minimization or maximization of the values $F_{red}(x^{(k)}), k = 1, \dots, K$.

2) build a permutation of variant numbers $\sigma: \{1, \dots, K\} \rightarrow \{1, \dots, K\}$ such that, for minimization, the following ordering holds:

$$F_{red}(x^{(\sigma(1))}) \leq F_{red}(x^{(\sigma(2))}) \leq \dots \leq F_{red}(x^{(\sigma(K))}),$$

and, for maximization, the following ordering holds:

$$F_{red}(x^{(\sigma(1))}) \geq F_{red}(x^{(\sigma(2))}) \geq \dots \geq F_{red}(x^{(\sigma(K))}),$$

where σ - permutation of variant numbers;

j - position number in the ordered sequence,
 $j = 1, \dots, K$;

$\sigma(j)$ - number of the variant that occupies the j -th position in the ordered sequence;

$x^{(\sigma(j))}$ - variant that occupies the j -th position in the ordered sequence by the values $F_{red}(x^{(k)}), k = 1, \dots, K$.

3) take the ordered sequence of variants as the result of evaluation:

$$x^{(\sigma(1))}, x^{(\sigma(2))}, \dots, x^{(\sigma(K))}.$$

The resulting algorithm determines the levels whose functionals take part in the reduced functional, forms one numerical estimate $F_{red}(x^{(k)})$ for each variant and orders the variants according to the selected task type. If, for a certain level, the corresponding functional has the same value for all variants from S , this level does not affect the ordering and is not included in W_{red} . Thus, the procedure keeps the sequential structure of the full multilevel model and uses only the levels that are sufficient for comparing the variants in the stated task.

Conclusions.

A multilevel functional model of performance indicators for a code division multiple access system has been considered with the separation of energy, structural, power-channel and system levels. The full model keeps a sequential structure in which the system-level indicator is obtained through the power-channel level indicator and the parameter vector that enters the system level. Functional reduction has been defined as a rule for forming a reduced functional by the levels for which, on a given set of compared variants, at least one pair of

variants has different values of the corresponding level functional. The proposed efficiency evaluation procedure determines the set of model levels sufficient for the stated task, forms the reduced functional using this set and orders the variants by the values of the reduced functional according to the selected task type. The practical value of the results is that the multilevel functional model together with the functional reduction procedure makes it possible to compare variants of code division multiple access systems using the set of model levels sufficient for the stated task, without replacing the sequential structure of the full model.

REFERENCES

1. IEEE Standard for Information technology--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs): Amendment 1: Add Alternate PHYs. IEEE 802.15.4a-2007. <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4a/3571/>.
2. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE 802.15.4z-2020. <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4z/10230/>
3. Indyk S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Kitov V. S. The Formation Method of Complex Signals Ensembles by Frequency Filtration of Pseudo-Random Sequences with Low Interaction in the Time Domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. No. 4. P. 7–14. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1>.
4. Жученко О. С., Індик С. В. Методологія оцінювання ефективності ансамблів різноенергетичних складних сигналів у надширокопasmових системах множинного доступу з кодовим розділенням. Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил безпеки і оборони : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 17 березня 2026 р., м. Харків. Харків : Нац. акад. НГУ, 2026. С. 368–370.
5. Zhuchenko O., Panchenko S., Lysechko V., Indyk S. Methodology of Equivalent Transformations of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code-Division Multiple Access Systems. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2026. Вип. 62. С. 337–345. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-38>.
6. Gorbachov V., Sytnikov D., Ryabov O., Batiia A. K., Ponomarenko O. Dimension Reduction for Network Systems Using Structure Model Aggregation. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2020. Vol. 15, No. 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.18280/ij dne.150103>.
7. Пономаренко О. Є., Горбачов В. О. Агрегація структурної моделі складних мережних систем. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 2023. Т. 1. № 71. С. 138–144. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.138>.
8. Пономаренко О. Є., Горбачов В. О. Програмна платформа для оцінювання ефективності агрегації структурної моделі складних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 3 (25). С. 79–87. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.079>.
9. Поліщук О. Д. Редукція складності моделей мережних структур та систем. *Доповіді Національної академії наук України*. 2019. № 6. С. 12–19. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.06.012>.
10. Berges J. M., Spütz K., Jacobs G., Kowalski J., Zerwas T., Berroth J., Konrad C. Automated Identification of Valid Model Networks Using Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2022. Vol. 10, No. 6. Article 250. <https://doi.org/10.3390/systems10060250>.
11. Zhang Y., Roeder J., Jacobs G., Berroth J., Hoepfner G. Virtual Testing Workflows Based on the Function-Oriented System Architecture in SysML: A Case Study in Wind Turbine Systems. *Wind*. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 599–616. <https://doi.org/10.3390/wind2030032>.
12. Hoepfner G., Kowalski J., Faustmann C., Zerwas T., Kranabittl P., Vafaei S., Jacobs G., Hick H. A Classification Method for the Systematic Identification of Models and Workflows in MBSE. *DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)*. 2022. 10 p. <https://doi.org/10.35199/dfx2022.17>.
13. Irnich L., Jacobs G., Zerwas T., Konrad C. Combining and evaluating function-oriented solutions in model-based systems engineering. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2023. Vol. 87. P. 375–386. <https://doi.org/10.1007/s10010-023-00619-0>.
14. Horta J., Siller M., Villarreal-Reyes S. Cross-layer latency analysis for 5G NR in V2X communications. *PLOS ONE*. 2025. Vol. 20, No. 1. e0313772. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313772>.
15. Rehman A., Valentini R., Cinque E., Di Marco P., Santucci F. On the Impact of Multiple Access Interference in LTE-V2X and NR-V2X Sidelink Communications. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 10. Article 4901. <https://doi.org/10.3390/s23104901>.
16. Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В., Сторчак А. В. Методи створення метамоделей: стан питання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4. С. 74–88. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-74-88>.
17. Mezzavilla M., Miozzo M., Rossi M., Baldo N., Zorzi M. A Lightweight and Accurate Link Abstraction Model for the Simulation of LTE Networks in ns-3. *MSWiM 2012 : Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2012. P. 55–60. <https://doi.org/10.1145/2387238.2387250>.
18. Wang J., Varshney N., Zhang J., Griffith D., Golmie N. Deep Learning Based Link-Level Abstraction for mmWave Communications. *2021 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing &*

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Communications, Internet of People and Smart City Innovation. 2021. P. 391–398.

<https://doi.org/10.1109/SWC50871.2021.00060>.

19. Wu Z., Bartoletti S., Martinez V., Bazzi A. A Methodology for Abstracting the Physical Layer of Direct V2X Communications Technologies. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 23. Article 9330. <https://doi.org/10.3390/s22239330>.

20. Ладанюк А. П., Смітюх Я. В., Власенко Л. О., Заєць Н. А., Ельперін І. В. Системний аналіз складних систем управління : навчальний посібник. Київ : НУХТ, 2013. 274 с. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/13508>.

21. Ніколаєв О. Г., Рвачова Т. В., Соловйов О. І. Функціональний аналіз : навчальний посібник. Харків : ХАІ, 2020. 164 с. <https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/8128>.

22. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Функціональний аналіз, адаптований до прикладних задач в галузі інформаційних технологій : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 192 с. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/34634>.

23. Panchenko S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Indyk S. V. Multi-Level Functional Model of Performance Indicators for Ultra-Wideband Code Division Multiple Access Systems. Сучасні наукові парадигми: інтеграція знань і технологій : матеріали науково-практичної конференції, м. Вінниця, 26–27 грудня 2025 р. Одеса : Видавництво «Молодий вчений», 2025. С. 121–123. <https://molodyivchenyi.ua/omp/index.php/conference/catalog/view/164/2843/5903-1>.

24. Лисечко В. П., Жученко О. С., Індик С. В. Система показників ефективності ансамблів різноенергетичних складних сигналів для надширокополосних систем множинного доступу з кодовим розділенням. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : тези доповідей шістнадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 29–30 квітня 2026 р. : у 5 т. Т. 5 : секція 6. Баку ; Харків ; Жиліна, 2026. С. 65–68. <https://doi.org/10.32620/ICT.26.t5>.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/101693>.

References

1. IEEE. (2007). *IEEE standard for information technology--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs): Amendment 1: Add alternate PHYs* (IEEE 802.15.4a-2007).
2. IEEE. (2020). *IEEE standard for low-rate wireless networks--Amendment 1: Enhanced ultra wideband (UWB) physical layers (PHYs) and*

associated ranging techniques (IEEE 802.15.4z-2020).

3. Indyk, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Kitov, V. S. (2020). The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 7–14.
4. Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Metodolohiia otsiniuvannia efektyvnosti ansambliv riznoenerhetychnykh skladnykh sygnaliv u nadshyrokosmuhovykh systemakh mnozhynnoho dostupu z kodovym rozdilenniam [Methodology for evaluating the effectiveness of multi-energy complex signal ensembles in ultra-wideband code-division multiple access systems]. In *Zastosuvannia informatsiynykh tekhnolohii u pidhotovtsi ta diialnosti syl bezpeky i oborony: Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 368–370). Natsionalna akademiia NHU.
5. Zhuchenko, O., Panchenko, S., Lysechko, V., & Indyk, S. (2026). Methodology of equivalent transformations of unequal-energy complex signal ensembles in code-division multiple access systems. *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: Osvita, nauka, vyrobnytstvo* [Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production], (62), 337–345.
6. Gorbachov, V., Sytnikov, D., Ryabov, O., Batiaa, A. K., & Ponomarenko, O. (2020). Dimension reduction for network systems using structure model aggregation. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 15(1), 13–23.
7. Ponomarenko, O. Ye., & Horbachov, V. O. (2023). Ahrehatsiia strukturnoi modeli skladnykh merezhykh system [Aggregation of the structural model of complex network systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats* [Control, Navigation and Communication Systems. Collection of Scientific Papers], 1(71), 138–144.
8. Ponomarenko, O. Ye., & Horbachov, V. O. (2023). Programna platforma dlia otsiniuvannia efektyvnosti ahrehatsii strukturnoi modeli skladnykh system [Software platform for evaluating the efficiency of structural model aggregation of complex systems]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti* [Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries], (3(25)), 79–87.
9. Polishchuk, O. D. (2019). Reduktsiia skladnosti modelei merezhevykh struktur ta system [Complexity reduction of models of network structures and systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine], (6), 12–19.
10. Berges, J. M., Spütz, K., Jacobs, G., Kowalski, J., Zerwas, T., Berroth, J., & Konrad, C. (2022).

- Automated identification of valid model networks using model-based systems engineering. *Systems*, 10(6), Article 250.
11. Zhang, Y., Roeder, J., Jacobs, G., Berroth, J., & Hoepfner, G. (2022). Virtual testing workflows based on the function-oriented system architecture in SysML: A case study in wind turbine systems. *Wind*, 2(3), 599–616.
 12. Hoepfner, G., Kowalski, J., Faustmann, C., Zerwas, T., Kranabittl, P., Vafaei, S., Jacobs, G., & Hick, H. (2022). A classification method for the systematic identification of models and workflows in MBSE. In *DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)* (pp. 1–10).
 13. Irmich, L., Jacobs, G., Zerwas, T., & Konrad, C. (2023). Combining and evaluating function-oriented solutions in model-based systems engineering. *Forschung im Ingenieurwesen*, 87, 375–386.
 14. Horta, J., Siller, M., & Villarreal-Reyes, S. (2025). Cross-layer latency analysis for 5G NR in V2X communications. *PLOS ONE*, 20(1), Article e0313772.
 15. Rehman, A., Valentini, R., Cinque, E., Di Marco, P., & Santucci, F. (2023). On the impact of multiple access interference in LTE-V2X and NR-V2X sidelink communications. *Sensors*, 23(10), Article 4901.
 16. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V., & Storchak, A. V. (2020). Metody stvorennia metamodelei: Stan pytannia [Methods of metamodels creating: State of the problem]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu* [Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute], (4), 74–88.
 17. Mezzavilla, M., Miozzo, M., Rossi, M., Baldo, N., & Zorzi, M. (2012). A lightweight and accurate link abstraction model for the simulation of LTE networks in ns-3. In *MSWiM 2012: Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems* (pp. 55–60). Association for Computing Machinery.
 18. Wang, J., Varshney, N., Zhang, J., Griffith, D., & Golmie, N. (2021). Deep learning based link-level abstraction for mmWave communications. In *2021 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Internet of People and Smart City Innovation* (pp. 391–398). IEEE.
 19. Wu, Z., Bartoletti, S., Martinez, V., & Bazzi, A. (2022). A methodology for abstracting the physical layer of direct V2X communications technologies. *Sensors*, 22(23), Article 9330.
 20. Ladaniuk, A. P., Smitiukh, Ya. V., Vlasenko, L. O., Zaiets, N. A., & Elperin, I. V. (2013). *Systemnyi analiz skladnykh system upravlinnia: Navchalnyi posibnyk* [System analysis of complex control systems: A textbook]. NUKhT.
 21. Nikolaiev, O. H., Rvachova, T. V., & Soloviov, O. I. (2020). *Funktsionalnyi analiz: Navchalnyi posibnyk* [Functional analysis: A textbook]. KhAI.
 22. Mokin, B. I., Mokin, V. B., & Mokin, O. B. (2020). *Funktsionalnyi analiz, adaptovanyi do prykladnykh zadach v haluzi informatsiinykh tekhnolohii: Navchalnyi posibnyk* [Functional analysis adapted to applied problems in the field of information technology: A textbook]. VNTU.
 23. Panchenko, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2025). Multi-level functional model of performance indicators for ultra-wideband code division multiple access systems. In *Suchasni naukovi paradyhmy: Intehratsiia znan i tekhnolohii: Materialy naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 121–123). Vydavnytstvo "Molodyi vchenyi".
 24. Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Systema pokaznykiv efektyvnosti ansambliv riznoenerhetychnykh skladnykh syhnaliv dlia nadshyrokosmuhovykh system mnozhynnoho dostupu z kodovym rozdilenniam [System of efficiency indicators for ensembles of multi-energy complex signals for ultra-wideband code-division multiple access systems]. In *Suchasni napriamy rozvytku informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii ta zasobiv upravlinnia: Tezy dopovidei shistnadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (Vol. 5, pp. 65–68). KhPI-Press.

Оцінювання ефективності системи множинного доступу з кодовим розділенням на основі багаторівневої функціональної моделі показників ефективності

У статті розглянуто задачу оцінювання ефективності системи множинного доступу з кодовим розділенням, у якій використовуються ансамблі різноенергетичних складних сигналів. Метою роботи є розроблення процедури оцінювання ефективності системи множинного доступу з кодовим розділенням на основі багаторівневої функціональної моделі показників ефективності з визначенням достатнього для розв'язування поставленої задачі складу рівнів моделі. У межах викладу багаторівневу функціональну модель визначено як упорядковану за ступенем узагальнення оцінок ефективності множини рівнів, кожному з яких поставлено у відповідність функціонали, що визначають показники ефективності.

Розглянуто енергетичний, структурний, потужнісно-каналний та системний рівні моделі, а також задано функціональні зв'язки між рівневими показниками і функціоналами. Повна модель зберігає послідовну структуру, у якій показник кожного вищого рівня визначається через показник попереднього суміжного рівня та параметри, що надходять на поточний рівень. Енергетичний рівень пов'язано з параметрами енергетичного складу ансамблю, структурний рівень - з параметрами взаємної кореляції сигналів, потужнісно-каналний

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

рівень - з відповідним параметром каналного рівня, а системний рівень - з узагальненням результату відповідно до поставленої задачі. Розроблено алгоритм функціональної редукції, який для заданої множини варіантів визначає множину рівнів, для яких існує хоча б одна пара порівнюваних варіантів з різними значеннями відповідного рівневого функціонала, визначає редукований функціонал і впорядковує варіанти за значеннями редукованого функціонала відповідно до обраного типу задачі. Якщо для певного рівня значення відповідного рівневого функціонала однакові для всіх порівнюваних варіантів, такий рівень не входить до редукованого функціонала. У результаті алгоритм дає змогу визначити склад рівнів, функціонали яких входять до редукованого функціонала, та склад рівнів, для яких на заданій множині варіантів не виявлено відмінності значень відповідних рівневих функціоналів. Практичне значення результатів полягає у можливості виконувати оцінювання ефективності, синтез або оптимізацію системи множинного доступу з кодовим розділенням за значеннями редукованого функціонала, визначеного на основі мінімально необхідного складу рівнів для заданої множини варіантів.

Ключові слова: система множинного доступу з кодовим розділенням; складний сигнал; показник ефективності; багаторівнева функціональна модель; функціональна редукція; редукований функціонал; енергетичний рівень; структурний рівень; потужнісно-каналний рівень; системний рівень.

Panchenko Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Acting rector of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-2833-4347. Tel.: +38 (057) 730-10-00. E-mail: info@kart.edu.ua.

Zhuchenko Oleksandr Serhiiiovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Lysechko Volodymyr Petrovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lysechko@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-1520-9515.

Indyk Serhii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3124-8722.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, в. о. ректора Українського державного

університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-2833-4347. Тел.: +38 (057) 730-10-00.

E-mail: info@kart.edu.ua.

Жученко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Лисечко Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна. E-mail: lysechko@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-1520-9515.

Індик Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3124-8722.

Стаття надійшла 27.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 27.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.