

УДК 621.391

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.013>

## ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ГІБРИДНОЇ ТОПОЛОГІЇ

**П.В. Анахов**

ДП "НЕК "Укренерго",

вул. Симона Петлюри, 25, Київ, 01032, Україна

e-mail: [Anahov.pv@ua.energy](mailto:Anahov.pv@ua.energy)

*Старіння обладнання, кліматичні зміни, зростання масштабів господарської діяльності, війна на Донбасі обумовлюють підвищену аварійність відомчої телекомунікаційної мережі енергетичної системи за рахунок руйнівної дії цих численних дестабілізуючих факторів. Робота мережі за таких обставин визначається її сталістю, забезпечення якої полягає в збереженні функціонування в разі виходу з ладу частини елементів. Міжнародна спілка електрозв'язку для підвищення сталості рекомендує застосування у вільному просторі гібридної радіо-оптичної технології передавання. Розглянуто архітектуру телекомунікаційної мережі з гібридною топологією. Показано, що сталість мережі забезпечують сталість і зв'язність технічних засобів, співвідношення сигнал/завада, величина часткового перетворення енергії. Бібл. 11, рисунок, табл. 3.*

**Ключові слова:** дестабілізуючий фактор, резервування в мережі, реконфігурація мережі, сталість засобів, сумісність засобів.

**Вступ.** Зважаючи на міру відповідальності в процесі забезпечення сталої роботи енергетичного обладнання Об'єднаної енергетичної системи України, до головних стратегічних цілей і напрямів реалізації технічної політики ДП "НЕК "Укренерго" віднесено випереджальний розвиток відомчої телекомунікаційної мережі (ТКМ) [1].

Старіння обладнання, кліматичні зміни, зростання масштабів господарської діяльності, війна на Донбасі обумовлюють підвищену аварійність ТКМ за рахунок руйнівної дії цих численних дестабілізуючих факторів (ДФ). Під дестабілізуючим фактором розуміють вплив на телекомунікаційну мережу, джерелом якого є фізичний або технологічний процес внутрішнього чи зовнішнього стосовно телекомунікаційної мережі характеру, що може призвести до виходу з ладу елементів мережі. Робота мережі за таких обставин визначається її сталістю, забезпечення якої полягає в збереженні функціонування в разі виходу з ладу частини елементів [2].

Здатність технічних засобів (ТЗ) функціонувати за призначенням без погіршення характеристик в умовах дії ДФ гарантується, якщо їх величина  $X_{in}$  не перевищує допустимого для даного обладнання граничного значення  $X_{accept}$  [3]:

$$X_{in\_i} \leq X_{accept\_i}, i=1,2,3,\dots, \quad (1)$$

де  $i$  – дестабілізуючі фактори.

Для виконання цієї умови рекомендуються заходи, описані, наприклад, в Рекомендаціях МСЕ L.92 щодо будівництва, монтажу і захисту кабелів та інших елементів ТКМ зовнішнього розміщення, Вимогах Мінпаливенерго і МНС України до підсистеми зв'язку системи фізичного захисту (№519/672 від 08.10.2009), Рекомендаціях Мінзв'язку РФ щодо забезпечення стійкості апаратних комплексів об'єктів дротового електрозв'язку до впливу дестабілізуючих факторів РД 45.083-99. У цілому вони зводяться до захисту елементів ТКМ від дії дестабілізуючих факторів шляхом підвищення сталості елементів мережі в умовах дії ДФ (допустимого граничного значення ДФ  $X_{accept}$ ), резервування елементів ТКМ, зниження взаємовпливів елементів за рахунок їх захисту від стороннього випромінювання, усунення впливу завад, придушення стороннього і власного випромінювань.

Міжнародною спілкою електрозв'язку (МСЕ) для підвищення сталості мережі рекомендовано застосування у вільному просторі бездротової гібридної радіооптичної технології передавання FSO/RF (від free-space optics/radio frequency – оптика вільного простору).

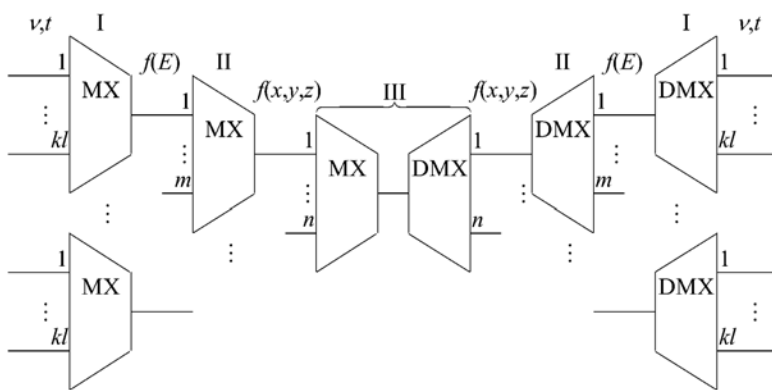
ру/радіочастота) [4]. Телекомунікаційною технологією, яка вважається перспективною і призначена для розширення радіочастотного спектра хвиль мереж доступу (лінії зв'язку останньої милі), є технологія бездротового оптичного зв'язку Li-Fi [5].

Радіооптичну технологію в різних атмосферних умовах (дощ, туман, створювані викидами димових труб штучні дими, смог) характеризують різні значення послаблення сигналу і розсіювання енергії в радіо і оптичних каналах [4], а також різні значення глибин їхніх замирань через обумовлене турбулентністю атмосферне мерехтіння [6]. Все це врешті-решт призводить до коливань потужності сигналу і зниження співвідношення сигнал/шум.

**Метою** статті є дослідження сталості функціонування телекомунікаційної мережі енергетичної системи в разі впровадження бездротової гібридної топології.

**Область дослідження і даних.** До складу телекомунікаційної мережі енергетичної системи України входять лінії та мережі зв'язку на основі кабельних ліній та мереж – дровових і волоконно-оптичних, високочастотної мережі зв'язку за повітряними лініями, мереж та каналів бездротового радіозв'язку (радіорелейні лінії, мережі рухомого радіозв'язку, супутникові канали зв'язку). Пом'якшенню гостроти сучасної проблеми перевантаження мереж та каналів бездротового радіозв'язку може сприяти використання оптичних діапазонів спектру, як прийнятної альтернативи радіочастотному спектру.

Архітектура телекомунікаційної мережі з гібридною топологією на додаток до часового і частотного мультиплексування каналів зв'язку підтримує мультиплексування з розділенням сигналів за фізичною природою (physical domain) і середовищами передавання (media) [7].



Мережу можна представити у вигляді деревовидної (ієрархічної) послідовності мультиплексорів (рисунок). Функціональна схема такої мережі включає три рівні: I – рівень мультиплексування каналів із частотним  $\nu$  і часовим  $t$  розділенням сигналів; II – рівень мультиплексування каналів із розділенням сигналів за фізичною природою  $f(E)$ ; III – рівень мультиплексування каналів

із розділенням сигналів за середовищами передавання  $f(x, y, z)$ . [8]

Ресурсні блоки каналів гібридної мережі включають інтервали частот  $\Delta \nu$ , часові інтервали  $\Delta t$ , фізичні природи сигналів  $E$ , середовища передавання  $(x, y, z)$  [8]:

$$R = f[\Delta \nu_k, \Delta t_l, E_m, (x, y, z)_n], k=1,2,3,\dots, l=1,2,3,\dots, m=1,2,3,\dots, n=1,2,3,\dots \quad (2)$$

**Результати.** Дієвим способом забезпечення сталості ТКМ є використання топологічної надмірності мережі. Нарощування ресурсів обумовлює підвищення надійності й живучості шляхом застосування додаткових каналів (ділянок каналів), надмірних відносно мінімально потрібних для виконання функцій передавання/приймання. У аварійних ситуаціях з'являється можливість реконфігурації мережі за рахунок заміни пошкоджених технічних засобів [9].

Шляхом впровадження у спільне середовище передавання "вільний простір" технологій бездротового оптичного зв'язку відбувається розширення ресурсів діючої телекомунікаційної мережі:

$$R^{add} = f[\Delta \nu_k^{add}, \Delta t_l^{add}, E_m^{add}, (x, y, z)_n^{add}] \quad k=1; \overline{k^{add}}, l=1; \overline{l^{add}}, m=1, n=1; \overline{n^{add}}, \quad (3)$$

де  $m$  – передавання оптичних сигналів (спосіб, використовуваний у діючих волоконно-оптичних лініях зв'язку);  $n^{add}$  – додаткові середовища, утворені вузько направленими FSO-системами і ненаправленими, з обмеженою дальністю передавання у вільному просторі системами Li-Fi.

Топологія телекомунікаційної мережі задається графом  $G(V, E)$ , описуваним матрицею суміжності [2]:

$$A = \|a_{ij}\|, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, \forall e_{ij} \in E; \\ 0, \forall e_{ij} \notin E. \end{cases} \quad (4)$$

Множині вершин графа  $v_i \in V$  відповідає множина станцій і вузлів розмірності  $n$ , а множині ребер  $e_{ij} \in E$  – множина каналів зв'язку між ними. Сталість функціонування телекомунікаційної мережі забезпечується за виконання умов [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi(G) \geq 2; \\ \lambda(G) \geq 2; \\ P_{ij}(t) \geq P_{ij}^{normalized}; i \neq j; i, j = \overline{1, n} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

де  $\chi(G)$  – число вершинної зв'язності (найменша кількість вершин, вилучення яких разом з інцидентними їм ребрами призводить до незв'язного чи одновіршинного графа);  $\lambda(G)$  – число реберної зв'язності (найменша кількість ребер, вилучення яких призводить до незв'язного графа);  $P_{ij}(t)$  – імовірність зв'язності (імовірність того, що повідомлення з вузла  $i$  у вузол  $j$  буде передано за час, який не перевищує  $t$ ).

Таким чином, розширення ресурсів  $R^{add}$  за рахунок вузлів і міжвузлових каналів обумовлює нарощування зв'язності технічних засобів.

Збільшення співвідношення сигнал/завада виконується за рахунок:

- підсилення корисного сигналу;
- захисту від стороннього випромінювання шляхом екранування, яке забезпечує поглинання, перетворення чи відбиття завад, або розміщення ТЗ поза зоною впливу завад, або усунення впливу завад на ТЗ;
- придушення стороннього і власного випромінювання, які можуть дестабілізувати власну роботу і роботу інших ТЗ.

Крім того, у випадках різних атмосферних умов переключення між каналами з різною фізичною природою сигналів обумовлює вибір каналу з меншим послабленням сигналу, завмиранням, розсіюванням енергії, що обертається підвищенням рівня корисного сигналу і збільшенням співвідношення сигнал/завада.

Технічні вимоги до надійності виконання функцій мають на меті дотримання принципу різноманітності каналів. Він передбачає, що складові частини мережі, які утворюють відповідну групу, тією чи іншою мірою відрізняються одна від одної та/або досягають поставленої задачі різними способами [9].

Сумісність обладнання визначають розташовані в спільному фізичному середовищі телекомунікаційні засоби, що передають сигнали різної фізичної природи – радіочастотні й світлові. Повідомляється, що FSO-обладнання і атмосферні оптичні лінії зв'язку несприйнятливі до радіоперешкод і самі їх не створюють. Проте не виключається можливість часткового перетворення одних видів енергії в інші. До причин трансформації спектра електромагнітного випромінювання у вільному просторі віднесено: поглинання енергії радіохвиль й інфрачервоне (теплове) випромінювання (absorption and infrared radiation); вимушене випромінювання фотона збудженою квантово-механічною системою під впливом резонансної електромагнітної хвилі (laser); флуоресценцію (fluorescence) [11].

Взаємодію сигналів гібридної мережі за рахунок часткового перетворення енергії можна уявити у вигляді матриці, де стовпчики представляють фізичну природу сигналу, а рядки – кількість середовищ передавання сигналів (табл. 1).

Таблиця 1

Спільне середовище (одне)	Радіосигнали		Світлові сигнали
	Висока ( $R_I$ )	Середня ( $R_{I,II}$ )	Висока ( $R_I$ )
Різні середовища (вузконаправлені радіо і оптичні лінії передачі, стільниковий зв'язок, Li-Fi тощо)	Середня ( $R_{I,III}$ )	Низька ( $R_{I,II,III}$ )	Середня ( $R_{I,III}$ )

За експертною оцінкою автора допоміжна характеристика, тобто величина взаємодії,

приймає одне з трьох умовних значень. У дужках показано рівень взаємодії відповідно до функціональної схеми мережі (рисунки).

Звідси, з урахуванням того, що сумісність обладнання є величиною, зворотною до величини взаємодії, запишемо:

$$C(R_I) \ll C(R_{II}) \ll C(R_{III}), \quad (6)$$

$$\text{де} \quad R_I = f[\Delta v_k, \Delta t_l, E_m, (x, y, z)_n], \quad k = \overline{1; k}, \quad l = \overline{1; l}, \quad m = \overline{1; m}, \quad n = \overline{1; n} \quad (7)$$

$$R_{II} = f[\Delta v_k, \Delta t_l, E_m, (x, y, z)_n], \quad k = \overline{1; k}, \quad l = \overline{1; l}, \quad m = \overline{1; m}, \quad n = \overline{1; n}, \quad (8)$$

$$R_{III} = f[\Delta v_k, \Delta t_l, E_m, (x, y, z)_n], \quad k = \overline{1; k}, \quad l = \overline{1; l}, \quad m = \overline{1; m}, \quad n = \overline{1; n}. \quad (9)$$

Доповнення діючої мережі оптичним ресурсом позначається на зниженні величини взаємовпливів між обладнанням.

**Обговорення результатів.** Способи протидії дестабілізуючим факторам і критерії оцінки сталості функціонування телекомунікаційної мережі наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результат дії ДФ	Протидія ДФ	Критерій оцінки сталості
Відмова/збій вузла, ділянки лінії	Підвищення сталості ТЗ в умовах дії ДФ	Сталість ТЗ
	Резервування ресурсів	Зв'язність ТЗ
Дія завод, спотворень, ослаблення, розсіювання, маскування тощо	Зниження взаємовпливів за рахунок:	Співвідношення сигнал/завада
	- захисту від стороннього випромінювання шляхом екранування, яке забезпечує поглинання, перетворення чи відбиття завод, або розміщення ТЗ поза зоною впливу завод, або усунення впливу завод на ТЗ;	
	- придушення стороннього і власного випромінювання, які можуть дестабілізувати власну роботу і роботу інших ТЗ	Величина часткового перетворення енергії

Таблиця 3

ГОСТ Р 53111-2008 [2]	Поточна робота
Структура побудови ТКМ забезпечує три незалежних шляхи зв'язку для основних напрямків зв'язку	Структура побудови ТКМ забезпечує (щонайменше) три незалежних шляхи зв'язку для основних напрямків зв'язку
У мережі електрозв'язку забезпечується можливість перерозподілу каналів на основних напрямках зв'язку	Те саме
У мережі електрозв'язку передбачено взаємодію з іншими мережами електрозв'язку для забезпечення взаємного резервування каналів зв'язку	Те саме
У мережі електрозв'язку застосовуються лінії зв'язку з різними середовищами передавання	У мережі електрозв'язку застосовуються лінії зв'язку з різними ресурсними блоками каналів, які на додаток до різних інтервалів частот і часових інтервалів використовують різні середовища передавання і сигнали різної фізичної природи
У мережі електрозв'язку передбачається система відновлення об'єктів зв'язку в разі їх можливого руйнування	Те саме
На основних напрямках зв'язку застосовуються кабелі зв'язку, прокладені в ґрунті	На основних напрямках зв'язку застосовуються різні середовища передавання і сигнали різної фізичної природи

**Висновки.** Дослідження показали покращення сталості функціонування телекомунікаційної мережі енергетичної системи після впровадження бездротової гібридної топології за рахунок:

- нарощування розгалуженості й збільшення резервування ліній зв'язку мережі з метою збільшення її показників зв'язності до необхідних значень;
- переключення в різних атмосферних умовах між каналами з різною фізичною природою, що обумовлює вибір каналу з меншим послабленням сигналу, завмиранням, розсіюванням

енергії. Ці дії призводять до підвищення рівня корисного сигналу і збільшення співвідношення сигнал/завада;

– використання в різних атмосферних умовах радіо і оптичного обладнання, яке має низьке значення часткового перетворення енергії, що обумовлює високу сумісність засобів телекомунікацій.

У табл. 3 представлено порівняння критеріїв сталості ГОСТ Р 53111-2008 і поточної роботи.

1. Технічна політика ДП "НЕК "Укренерго" у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж. СОУ НЕК 20.261:2018 Київ: ДП "НЕК "Укренерго". 2018. 114 с.
2. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. ГОСТ Р 53111-2008. Москва: Стандартинформ, 2009. 16 с.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Санкт-Петербург: БХВ. Петербург, 2006. 704 с.
4. Recommendation ITU-R P.1817-1.02.2012 Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links. Geneva: ITU, 2007. 17 p.
5. Report ITU-R SM.2422-0.06/2018. Visible light for broadband communications. SM Series, Spectrum management. Geneva: ITU, 2007. 16 p.
6. Recommendation ITU-R P.1814\* 08.2007 Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links. Question ITU-R 228/3. Geneva: ITU, 2007. 12 p.
7. Recommendation ITU-T G.872.01.201 Series G: transmission systems and media, digital systems and networks. Digital networks. Optical transport networks. Architecture of optical transport networks. Geneva: ITU, 2007. 61 p.
8. Анахов П.В. Збільшення пропускної спроможності ділянки телекомунікаційної мережі за рахунок просторово-енергетичного мультиплексування. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2017. Т. 19, № 1. С. 50–54.
9. Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій. НП 306.2.202-2015. 22.07.2015. № 140.
10. Барабаш О.В., Бодров С.В., Мусієнко А.П. Аналіз побудови мережі відеоконтролю пунктів митного спостереження на основі функціонально стійкої системи. *Зв'язок*. 2014. № 2. С. 8–11.
11. Santamarina J. C., Fratta D. Dynamic energy coupling. Electro-seismic and Seismo-electric effects. *Transport in Porous Media*. 2003. Vol. 50, No. 1–2. Pp. 152–178. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020648204185>.

УДК 621.391

## ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ГИБРИДНОЙ ТОПОЛОГИИ

**П.В. Анахов**

ГП "НЭК "Укрэнерго",

ул. Симона Петлюры, 25, Киев, 01032, Украина

*Старение оборудования, климатические изменения, рост масштабов хозяйственной деятельности, война на Донбассе обуславливают повышенную аварийность телекоммуникационной сети за счет разрушительного действия этих многочисленных дестабилизирующих факторов. Работа сети при таких обстоятельствах определяется ее устойчивостью, обеспечение которой заключается в сохранении работы при выходе из строя части элементов. Международный союз электросвязи для повышения устойчивости сети рекомендовал применение в свободном пространстве беспроводной гибридной радиооптической технологии передачи FSO/RF. Также перспективной телекоммуникационной технологией, которая позиционируется для расширения радиочастотного спектра волн сетей доступа, считают беспроводную оптическую связь Li-Fi. Архитектура сети с гибридной топологией в дополнение к временному и частотному мультиплексированию каналов связи поддерживает мультиплексирование с разделением сигналов по физической природе и средах передачи. Исследования показали улучшение устойчивости функционирования телекоммуникационной сети энергетической системы после внедрения беспроводной гибридной топологии за счет следующих действий: 1) наращивания разветвленности и увеличение резервных линий связи сети с целью увеличения ее показателей связности до требуемых значений; 2) переключения в различных атмосферных условиях между каналами с разной физической природой, что обуславливает выбор канала с меньшим ослаблением сигнала, замиранием, рассеянием энергии; эти действия оборачиваются повышением уровня полезного сигнала и увеличением отношения сигнал/шум; 3) использования в различных атмосферных условиях радио и оптического оборудования с низкой величиной частичного преобразования энергии, что обуславливает высокую совместимость средств телекоммуникаций. Библ. 11, рисунок, табл. 3.*

**Ключевые слова:** дестабилизирующий фактор, резервирование в сети, реконфигурация сети, устойчивость средств, совместимость средств.

## INCREASE OF SUSTAINABILITY OF THE TELECOMMUNICATION NETWORK OF ENERGY TRANSMISSION SYSTEM BY THE IMPLEMENTATION OF THE WIRELESS HYBRID TOPOLOGY

P.V. Anakhov

SE "NPC "Ukrenergo",

25 Symona Petliury str., Kyiv, 01032, Ukraine

*Aging of equipment, climatic changes, the growth of economic activity, the war in the Donbass cause an increased accident rate of the telecommunications network due to the action of numerous destabilizing factors. The operation of network in such circumstances is determined by its sustainability, the maintenance of which consists in preserving the work, when part of the elements fail. The International Telecommunication Union to improve network sustainability has recommended the use of wireless hybrid radio-optical transmission technology FSO/RF in free space; also a promising telecommunications technology, which is positioned to expand the radio frequency spectrum of last mile, consider wireless optical communication Li-Fi. The network architecture with a hybrid topology in addition to time and frequency multiplexing of communication channels supports multiplexing with the separation of signals in conformity with their physical domain and transmission media. Studies have shown an improvement in the sustainability of the telecommunications network of the energy system after the introduction of the wireless hybrid topology through the following actions: 1) increasing branching and redundant of telecommunication lines of the network to increase its network connectivity to the required values; 2) switching in different atmospheric conditions between channels with different physical nature, which causes the choice of a channel with less signal attenuation, fading, energy dissipation; these actions result in an increase of the level of the useful signal and an increase in the signal-to-noise ratio; 3) the use in different atmospheric conditions of radio and optical equipment, with a low value of the partial energy conversion, which leads to a high compatibility of telecommunications facilities. References 11, figure, tables 3.*

**Key words:** destabilizing factor, network redundancy, reconfiguration of network, sustainability of tools, compatibility of tools.

1. SOU NPC 20.261:2018 Technical policy of SE NPC Ukrenergo in the field of development and operation of backbone and interstate electric networks. Kyiv: SE NEK Ukrenergo. 2018. 114 p. (Ukr)
2. GOST P 53111-2008 Sustainability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods. Moskva: Standartinform, 2009. 16 p. (Rus)
3. Polovko A.M., Gurov S.V. Fundamentals of the theory of reliability. St. Petersburg. 2006. 704 p. (Rus)
4. Recommendation ITU-R P.1817-1.02.2012. Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links. Geneva: ITU, 2007. 17 p.
5. Report ITU-R SM.2422-0 (06/2018) Visible light for broadband communications. SM Series, Spectrum management. Geneva: ITU, 2007. 16 p.
6. Recommendation ITU-R P.1814\* 08.2007. Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links. Question ITU-R 228/3. Geneva: ITU, 2007. 12 p.
7. Recommendation ITU-T G.872. 01.2017. Series G: transmission systems and media, digital systems and networks. Digital networks. Optical transport networks. Architecture of optical transport networks. Geneva: ITU, 2007. 61 p.
8. Anakhov P.V. Increasing of the channel capacity of part of telecommunication network by space-energy multiplexing. *Data Registration, Storage and Processing*. 2017. Vol. 19, No 1. Pp. 50–54. (Ukr)
9. NP 306.2.202-2015 Requirements for nuclear and radiation safety for information and control systems important for the safety of nuclear power plants. 22.07.2015, No 140. (Ukr)
10. Barabash O.V., Bodrov S.V., Musienko A.P. Analysis of building a network video surveillance point of customs supervision on the basis of functional stability system. *Communication*. 2014. No 2. Pp. 8–11. (Ukr)
11. Santamarina J. C., Fratta D. Dynamic energy coupling. Electro-seismic and Seismo-electric effects. *Transport in Porous Media*. 2003. Vol. 50. No 12. Pp. 152–178. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020648204185>.

Надійшла 11.06.2019

Received 11.06.2019