

**Кравченко Владислав Ігорович**

*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0000-0002-4758-7027

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗІВ**

***Анотація.** В статті досліджена гетерогенна телекомунікаційна мережа та її структура. Проаналізовано вплив прогнозів навантаження на оптимізацію розподілу ресурсів у мережі та встановлюють зв'язок між точністю прогнозування та ефективністю використання мережевих ресурсів. Прогнозування навантаження відкриває можливість операторам та адміністраторам мережі пристосовувати розподіл ресурсів відповідно до змін у навантаженні та трафіку. Цей підхід дозволяє уникнути перевантажень, забезпечити високу якість обслуговування і знизити витрати на енергію. Крім того, він допомагає уникнути надмірного виділення ресурсів, що може призвести до марної витрати ресурсів та зниження ефективності мережі.*

*Представлені концепції прогнозування навантаження трафіку з'єднання та мережевої взаємодії для вирішення проблем, з якими стикається децентралізований розподіл пропускної здатності в динамічному середовищі. В статті представлені результати експериментальних досліджень, що підтверджують переваги використання системи розподілу ресурсів на основі прогнозів навантаження, такі як покращення якості обслуговування та ефективне використання мережевих ресурсів.*

*Переваги застосування прогнозування навантаження трафіку включають покращення розподілу смуги пропускання на дзвінок та ефективне управління ресурсами мережі з урахуванням передбачуваного навантаження. Прогнозування дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів, зменшуючи витрати на доступ до каналу та підвищуючи ефективність використання мережевих ресурсів.*

*В статті надані рекомендації по застосуванню запропонованої методики прогнозування навантаження.*

***Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, гетерогенна мережа, прогнозування трафіку, управління, навантаження, смуга пропускання.*

**Kravchenko Vladislav**

*State university of information and communication technologies, Kyiv*

ORCID 0000-0002-4758-7027

## **IMPROVING THE QUALITY OF HETEROGENEOUS TELECOMMUNICATION NETWORKS WITH THE HELP OF FORECAST-BASED RESOURCE ALLOCATION**

***Abstract.** The article examines a heterogeneous telecommunication network and its structure. The impact of load forecasts on optimizing the distribution of resources in the network is analyzed, and the relationship between the accuracy of forecasting and the efficiency of the use of network resources is established. Load forecasting enables network operators and administrators to adjust resource allocation to changes in load and traffic. This approach allows you to avoid overloads, ensure high quality of service and reduce energy costs. In addition, it helps avoid over-allocation of resources, which can lead to wasted resources and reduced network performance.*

*Concepts of connection traffic load prediction and network interaction are presented to address the challenges faced by decentralized bandwidth allocation in a dynamic environment. The article presents the results of experimental studies that confirm the benefits of using a resource allocation system based on load forecasts, such as improving the quality of service and efficient use of network resources.*

*The benefits of using traffic load forecasting include improved bandwidth allocation per call and efficient management of network resources based on predicted load. Prediction allows you to optimize the*

*allocation of resources, reducing channel access costs and increasing the efficiency of using network resources.*

*The article provides recommendations on the application of the proposed method of load forecasting.*

**Key words:** *telecommunication network, heterogeneous network, traffic forecasting, management, load, bandwidth.*

### **1. Вступ.**

Гетерогенні мережі, що об'єднують різноманітні пристрої та технології з різними характеристиками та ресурсами, стають все більш поширеними, включаючи мобільні, бездротові та провідні системи. Ефективне управління ресурсами у таких мережах стає вирішальним для забезпечення якості обслуговування та оптимального використання доступних можливостей.

Одним із ключових викликів у гетерогенних мережах є оптимізація використання ресурсів, таких як пропускна здатність, енергія, частотні ресурси та обчислювальна потужність. Завдяки постійному зростанню обсягів даних та додатків, а також різноманітності пристроїв та їхніх можливостей, необхідність у розумному розподілі цих ресурсів стає ще більш належною. Ефективне управління ресурсами може допомогти забезпечити стабільність та високу продуктивність мережі в умовах зростаючих навантажень та різноманітних вимог користувачів.

Крім того, з появою нових концепцій та технологій, таких як Internet of Things (IoT), 5G мережі та обчислення на краю мережі (edge computing), стає ясною необхідність адаптації стратегій розподілу ресурсів до нових викликів та можливостей. Інтеграція цих технологій у гетерогенні мережі потребує гнучкості та інтелектуальності у розподілі ресурсів для оптимальної підтримки різних типів додатків та вимог користувачів. Таким чином, розробка ефективних стратегій розподілу ресурсів у гетерогенних мережах є актуальною та важливою задачею в сучасному телекомунікаційному середовищі.

### **2. Мета дослідження.**

Прогнозування навантаження дозволяє отримати інформацію про очікувані обсяги трафіку та навантаження на мережу у майбутньому. Ця інформація може бути використана для попереднього розподілу ресурсів з урахуванням передбачуваних навантажень, що дозволить забезпечити оптимальне використання ресурсів та ефективне управління їхнім розподілом.

Прогнозування навантаження дозволяє мережевим операторам та адміністраторам адаптувати розподіл ресурсів до змін в навантаженні та трафіку, уникнути перевантажень, забезпечити високу якість обслуговування та знизити витрати на енергію. Крім того, це також дозволяє уникнути надмірного виділення ресурсів, що може призвести до марної витрати ресурсів та зменшення ефективності мережі.

Мета дослідження полягає в дослідженні ефективних стратегій розподілу ресурсів у гетерогенних телекомунікаційних мережах з використанням прогнозування навантаження.

### **3. Результати дослідження.**

Гетерогенна мережа – це інтегроване середовище, яке складається з підмереж, що працюють за різними стандартами та різними технологіями. Між підмережами здійснюється непомітний для користувачів "безшовний" перехід, який дозволяє працювати мережі як єдиній системі.

Схему повноцінної гетерогенної телекомунікаційної мережі можна представити трирівневою ієрархічною послідовністю мультиплексорів (рис. 1).

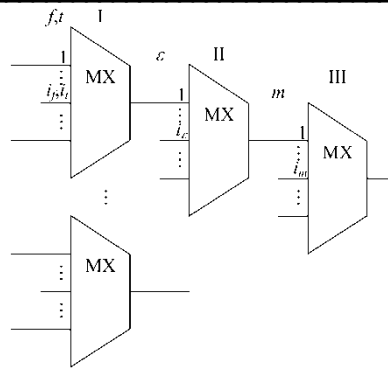


Рис. 1. Функціональна схема гетерогенної ТКМ: I – рівень мультиплексування каналів з частотно-часовим розділенням сигналів; II – рівень мультиплексування каналів з розділенням сигналів по фізичній природі; III – рівень мультиплексування каналів з розділенням сигналів по середовищу передавання

В динамічному середовищі з прибуттям та відправленням дзвінків,  $K_{l_n}^h$  може відхилитися від  $\widehat{K}_{l_n}^h$  протягом деякого часу. Проте, виділена смуга пропускання на етапі роботи не пристосовується до короткострокової динаміки у навантаженні трафіку дзвінків. Отже, навіть якщо в системі є достатні ресурси, які можна використовувати для поліпшення якості відеодзвінка, дзвінку може бути призначена лише його мінімально необхідна пропускна здатність. У системі з постійним розподілом вартості ресурсів ці невикористані додаткові ресурси (при мінімальному навантаженні трафіку дзвінку) фактично зарезервовані для можливих вхідних дзвінків, щоб задовольнити цільовий дзвінок. Розподіл смуги пропускання, адаптивний до короткострокового навантаження трафіку з'єднання (через перерозподіл смуги пропускання на дзвінки, що обслуговуються) може допомогти забезпечити кращу якість обслуговування – компроміс між існуючими дзвінками (з точки зору обсягу виділеної смуги пропускання на кожен дзвінок) та потенційні вхідні дзвінки (з точки зору ймовірності блокування дзвінків).

З цієї метою запропоновано оновлювати  $\widehat{K}_{l_n}^h \forall h \in \mathcal{H}, l \in \mathcal{L}, n \in \mathcal{N}$  періодично з періодом  $\lambda$ .

Нехай час розподілено на безліч періодів  $T$  постійної тривалості  $\lambda, T = \{T_1, T_2, \dots, T_o, \dots\}$ . Нехай  $t_o$  позначає початок кожного періоду  $T_o$ . Вектор часу подій прибуття для дзвінків абонентів мережі  $h$  з класом обслуговування  $l$  в зоні обслуговування  $n$  протягом періоду  $T_o$  позначається  $\overline{T}_{nlh}^o$ .

Алгоритм методики розподілу ресурсів на основі прогнозування складається з наступних кроків:

Крок 1: Дано нове встановлення з'єднання в момент часу  $t_\pi^o \in \overline{T}_{nlh}^o, \pi \in \{1, 2, \dots, |\overline{T}_{nlh}^o|\}$  за період  $T_o$ , кількість дзвінків абонентів мережі  $h$  з класом обслуговування  $l$  в обслуговуванні площі  $n$  в момент часу  $K_{l_n}^h(t_\pi^o)$ , використовується базова станція в цій зоні обслуговування для передбачення ймовірності кількості дзвінків у момент часу  $t_\pi^o + \tau$  у наступний період часу  $T_{o+1}$ . Отже,  $\tau$  називається тривалістю прогнозування. Передбачуване число,  $\overline{K}_{nl}^h(t_\pi^o - \tau)$  повинно задовольняти умову

$$R_p \left( K_{nl}^h(t_\pi^o + \lambda) > \tilde{K}_{nl}^h(t_\pi^o + \lambda) \middle| K_{l_n}^h(t_\pi^o) \right) \leq e_{l_n}^h \quad \forall h \in \mathcal{H}, l \in \mathcal{L}, n \in \mathcal{N} \quad (1)$$

Для того, щоб визначити  $\bar{K}_{nl}^h(t_\pi^o - \tau)$ , обчислюється функція масової умовної ймовірності  $\bar{K}_{nl}^h(t_\pi^o - \tau)$  з урахуванням  $K_{nl}^h(t_\pi^o)$ ,  $f_{K_{nl}^h(t_\pi^o + \tau) | K_{nl}^h(t_\pi^o)}(k)$ , обчислюється з використанням перехідного розподілу побудови моделі  $M/G/\infty$ . Введено наступні позначення:

- $\varphi_\lambda^{l_{nh}}$  – ймовірність того, що дзвінок абонентів мережі  $h$  з класом обслуговування  $l$  який знаходиться в зоні обслуговування  $n$  в момент  $t_\pi^o$  все ще присутній в тій же зоні обслуговування в момент часу  $t_\pi^o + \tau$ ;
- $\theta_\lambda^{l_{nh}}$  – ймовірність того, що дзвінок абонентів мережі  $h$  з класом обслуговування  $l$  що прибуває в зону обслуговування  $n$  протягом  $(t_\pi^o, t_\pi^o + \tau]$  все ще присутній у тій же зоні обслуговування в момент часу  $t_\pi^o + \tau$ ;
- $\rho(x_1, x_2)$  – біноміальна випадкова величина з параметрами  $x_1, x_2$ ;
- $\phi(x)$  – випадкова величина Пуассона із середнім значенням  $x$ .

Використовуючи  $K_{nl}^h(t_\pi^o)$ , отримано наступний вираз

$$K_{ln}^h(t_\pi^o + \lambda) = r(K_{ln}^h(t_\pi^o), \varphi_\lambda^{l_{nh}}) + \phi(v_{ln}^h \lambda \theta_\lambda^{l_{nh}}) \quad (2)$$

Ймовірності  $\varphi_\lambda^{l_{nh}}$  та  $\theta_\lambda^{l_{nh}}$  визначаються наступним чином

$$\varphi_\lambda^{l_{nh}} = \frac{1}{D[T_m^{l_{nh}}]} \int_\lambda^\infty Rp(T_m^{l_{nh}} > y) dy = \frac{1}{D[T_m^{l_{nh}}]} \int_\lambda^\infty (1 - Y_{T_m^{l_{nh}}}(y)) dy \quad (3)$$

$$\theta_\lambda^{l_{nh}} = \int_0^\lambda \frac{1}{T} Rp(T_m^{l_{nh}} > y) dy = \int_0^\lambda \frac{1}{\lambda} (1 - Y_{T_m^{l_{nh}}}(y)) dy = \frac{D[T_m^{l_{nh}}]}{\lambda} (1 - \varphi_\lambda^{l_{nh}}) \quad (4)$$

де  $Y_{T_m^{l_{nh}}}(y) = \int_0^y y_{T_m^{l_{nh}}}(t) dt$  – сукупні функції розподілу  $T_m^{l_{nh}}$ . Функцію масової умовної ймовірності,  $y_{K_{ln}^h(t_\pi^o + \lambda) | K_{ln}^h(t_\pi^o)}(k)$ , можна обчислити, використовуючи (2) - (4). Отже,  $\tilde{K}_{ln}^h(t_\pi^o + \lambda)$  можна обчислити за допомогою (2) як мінімальне ціле число, що задовольняє

$$\sum_{k=0}^{\tilde{K}_{ln}^h(t_\pi^o + \lambda)} y_{\tilde{K}_{ln}^h(t_\pi^o + \lambda) | \tilde{K}_{ln}^h(t_\pi^o)}(k) \geq (1 - \epsilon_{ln}^h) \quad (5)$$

Крок 2: Кожна базова станція в географічному регіоні реєструє прогнозовані значення

$$\tilde{K}_{ln}^h(t_\pi^o + \lambda), \quad \forall h \in H, l \in L, n \in N \quad \pi = \{1, 2, \dots, |\tilde{\lambda}_{ln}^o|\}$$

у векторі  $\tilde{\kappa}_{ln}^{o+1}$ .

Крок 3: Для абонентів кожної мережі  $h \in H$  – максимально передбачуване число дзвінків з кожного класу обслуговування  $l \in L$  у кожній зоні обслуговування  $n \in N$  протягом  $T_{o+1}$ ,  $\tilde{K}_{ln}^h(T_{o+1})$ , обчислюється при  $t_{o+1}$  від  $\tilde{K}_{nlh}^{o+1}$ . Отже,  $\tilde{K}_{nlh}^h(T_{o+1}) = \max(\bar{K}_{nlh}^{o+1})$ , якщо воно менше або дорівнює  $S_{nl}^h$ , інакше  $\tilde{K}_{nlh}^h(T_{o+1}) = S_{nl}^h$ . Це гарантує, що для  $\tilde{K}_{nk}^h(T_{o+1}) \leq S_{nl}^h$ , маємо

$$Rp(K_{ln}^h(t_\pi^{o+1}) > \tilde{K}_{ln}^h(T_{o+1})) \leq \epsilon_{ln}^h \quad \forall h \in H, l \in L, n \in N, \pi \in \{1, 2, \dots, |\tilde{\lambda}_{ln}^{o+1}|\} \quad (6)$$

Крок 4: За допомогою спільної роботи в мережі, різних базових станцій в географічному регіоні, обмінюватися своєю інформацією щодо  $\tilde{K}_{ln}^h(T_{o+1})$ ,  $\forall h \in H, l \in L, n \in N$ .

Крок 5: Під час  $T_{o+1}$  кожна АТ у географічному регіоні, включаючи вхідні і вже існуючі з'єднання, використовує отримані значення вартості доступу до каналу базової станції в цей період, щоб визначити та попросити частку пропускної здатності від кожної доступної базової станції. Це досягається шляхом виконання кроків 2-4 в системі з постійним розподіл вартості ресурсів.

Крок 6: Кожен абонентський термінал звітує перед базовими станціями / точками доступу, про свій клас обслуговування, домашньої мережі та перелік ідентифікаторів базової станції / точки доступу, які абонентський термінал може отримати. Базові станції / точки доступу різних мереж використовують цю інформацію для прогнозування  $\tilde{K}_{l_n}^h(T_{o+1})$ ,  $\forall h \in \mathcal{H}$ ,  $l \in \mathcal{L}$ ,  $n \in \mathcal{N}$ , протягом наступного періоду  $T_{o+2}$  для оновлення їх цін на доступ до послання в момент часу  $t_{o+2}$ .

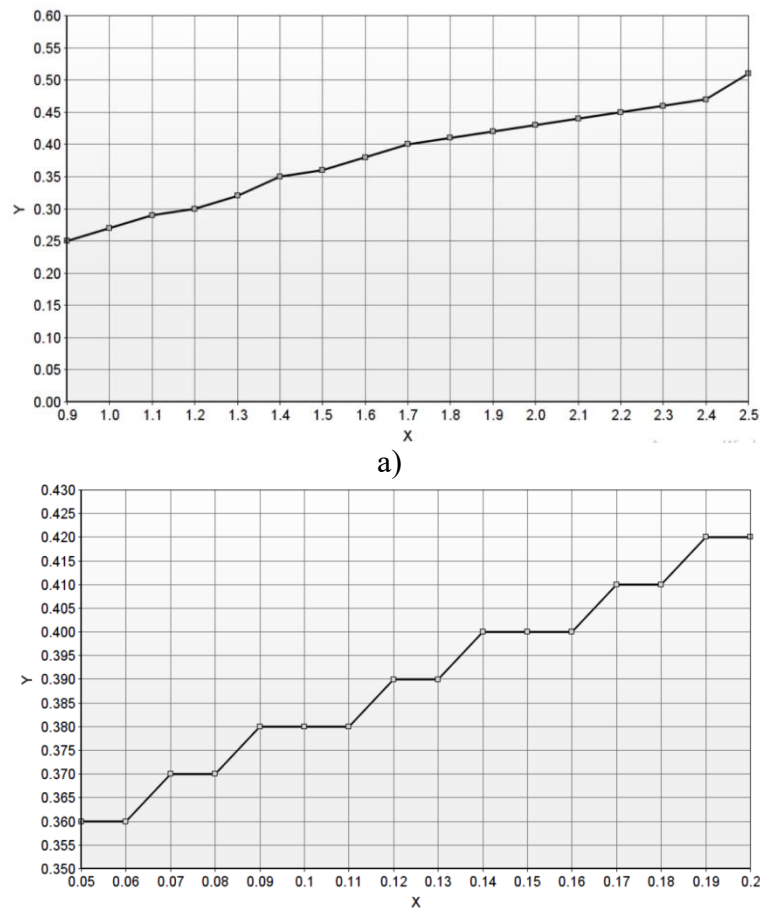


Рис. 2. Ефективність механізму розподілу ресурсів на основі прогнозування порівняно з  $\epsilon$ : (а) розподіл смуги пропускання на дзвінок; (б) імовірність блокування дзвінків

Поки система з постійним розподілом вартості ресурсів використовує ціль  $\tilde{K}_{l_n}^h$  з фази налаштування на основі стійкої довгострокової статистики для розподілу смуги пропускання на етапі роботи, алгоритм розподілу ресурсів на основі прогнозування оновлює цільове значення на  $\tilde{K}_{l_n}^h(T_o)$  кожного періоду  $T_o$ ,  $o = \{1, 2, \dots\}$ , використовуючи поточну кількість дзвінків в службі. Використовуючи цю додаткову інформацію, методика розподілу ресурсів на основі прогнозування може зробити краще прогнозування навантаження на дзвінки в географічному регіоні в короткостроковій перспективі і, отже, кращий розподіл пропускної здатності над системою з постійним розподілом вартості ресурсів. Методика розподілу ресурсів на основі прогнозування забезпечує вдосконалене неоптимальне рішення проблеми порівняно з механізмом з постійним розподіл вартості ресурсів. Оскільки значення вартості

доступу до каналу базової станції / точки доступу протягом періоду  $T_o$  базуються на  $\tilde{K}_{ln}^h(T_o)$ , базова станція / точка доступу розподіляє свої доступні ресурси саме серед  $\tilde{K}_{ln}^h(T_o)$  для дзвінків протягом періоду  $T_o$ . Таким чином, слідуючи визначенням у (2) та (6) та використовуючи ті ж самі аргументи що і для системи з постійним розподілом вартості ресурсів,  $e_{nl}^h$  служить верхньою межею ймовірності блокування дзвінка для  $\tilde{K}_{nlh}^h(T_{o+1}) \leq S_{nl}^h$ .

На рис. 2 показана ефективність механізму розподілу ресурсів на основі прогнозування з точки зору кількості розподілу смуги пропускання на дзвінок та ймовірність блокування дзвінків у порівнянні з  $e$  з приходом дзвінка коефіцієнта  $v = 1,7$  дзвінків / хвилину та тривалість прогнозування  $\lambda = 1$  хвилина. Зі збільшенням  $e$  механізм розподілу ресурсів на основі прогнозування враховує одночасну присутність меншої кількості дзвінків у службі в наступний час  $\lambda$  при розрахунку значення вартості доступу до лінії зв'язку. Це призводить до збільшення ймовірності блокування дзвінків з  $e$ . Загалом, ймовірність блокування дзвінків не перевищує його верхню межу  $e$ , як показано на рис. 2. Однак розподіл смуги пропускання на дзвінок покращується за допомогою  $e$ , оскільки менше ресурсів зарезервовано для вхідних дзвінків, що буде, більше ймовірно, заблоковано. Таким чином, існує компроміс між цими двома показниками ефективності.

Ефективність запропонованої методики з точки зору величини розподілу смуги пропускання на дзвінок та ймовірність блокування дзвінків проти тривалості прогнозування  $\lambda$ , з коефіцієнтом прибуття дзвінка  $v = 1,7$  дзвінків / хвилину та  $e = 1\%$ . З більшою тривалістю прогнозування  $\lambda$ , механізм розподілу ресурсів на основі прогнозування оновлює вартість доступу до каналу рідше і більше передбачається кількість одночасно присутніх дзвінків. В результаті сума виділених пропускнух здатностей на дзвінок зменшується. Знову ж таки, ймовірність блокування дзвінків не перевищує її верхню межу  $e$  з різними значеннями  $\lambda$ .

#### 4. Висновок.

Дослідження показує, що використання системи розподілу ресурсів на основі прогнозів навантаження є ефективним підходом до підвищення якості обслуговування в гетерогенних телекомунікаційних мережах. Прогнозування навантаження дозволяє мережевим операторам адаптувати розподіл ресурсів залежно від змін у навантаженні та трафіку, уникнути перевантажень, забезпечити високу якість обслуговування та знизити витрати на енергію.

Рекомендується впровадити систему прогнозування навантаження в телекомунікаційну інфраструктуру для оптимізації розподілу ресурсів та підвищення ефективності мережі. Необхідно провести аналіз і визначити оптимальні параметри прогнозування, такі як тривалість прогнозування та точність прогнозів, для максимальної ефективності системи. Важливо розробити механізми виявлення та корекції неточностей у прогнозах, щоб забезпечити надійність прогнозів і запобігти непередбаченим проблемам у мережі. Після впровадження системи рекомендується постійно моніторити її ефективність і вдосконалювати, враховуючи зміни в технологічному середовищі та вимоги користувачів.

#### Список використаної літератури

1. Recommendation ITU-R P.1817-1 (02/2012). Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links.
2. P. Anakhov, V. Zhebka, G. Grynkevych and A. Makarenko. Protection of telecommunication network from natural hazards of global warming. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No. 3/10, pp. 26–37.
3. George Halkos, Shunsuke Managi and Nickolaos G. Tzeremes. The effect of natural and man-made disasters on countries' production efficiency. Journal of Economic Structures. 2015. Vol. 4:10.

4. ITU-D Study Group 2. Question 6/2: ICT and climate change. Final Report. Geneva: ITU, 2017. 64 p.
5. P. Babarczy, M. Klügel, A. M. Alba, A. He, J. Zerwas, P. Kalmbach, A. Blenk and W. Kellerer. A mathematical framework for measuring network flexibility. *Computer Communications*. 2020. Vol. 164, pp. 13–24.
6. F. Rahman. Save the world versus man-made disaster: A cultural perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 235, 012071.
7. Mohamed H. A. R. A Proposed Model for IT Disaster Recovery Plan. *Ijmecs*. 2014. Vol. 6, No. 4, pp. 57–67. DOI: 10.5815/ijmecs.2014.04.08
8. Weather and Climate Services in Europe and Central Asia. A Regional Review / World Bank Working Paper No. 151. Washington, D.C., 2008. 79 p.
9. Журавель А.С., Кравчук С.О. Безпроводові мережі доступу з динамічним вибором спектру // Матер. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 18–21 квітня, 2017 р. – К.: Хімджест, 2017. – С. 172–174.
10. Anakhov P., Zhebka V., Bondarchuk A., Storchak K., Sablina M. Increasing the Reliability of a Heterogeneous Network using Redundant Means and Determining the Statistical Channel Availability Factor / *CEUR Workshop Proceedings* Эта ссылка отключена., 2023, 3421, p. 231–236
11. Anakhov P., Zhebka V., Popereshnyak S., Skladannyi P., Sokolov V. Protecting Objects of Critical Information Infrastructure from Wartime Cyber Attacks by Decentralizing the Telecommunications Network / *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, 3550, p. 240–245

### References

1. Recommendation ITU-R P.1817-1 (02/2012). Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links.
2. P. Anakhov, V. Zhebka, G. Grynkevych and A. Makarenko. Protection of telecommunication networks from natural hazards of global warming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. No. 3/10, pp. 26–37.
3. George Halkos, Shunsuke Managi and Nickolaos G. Tzeremes. The effect of natural and man-made disasters on countries' production efficiency. *Journal of Economic Structures*. 2015. Vol. 4:10.
4. ITU-D Study Group 2. Question 6/2: ICT and climate change. Final Report. Geneva: ITU, 2017. 64 p.
5. P. Babarczy, M. Klügel, A. M. Alba, A. He, J. Zerwas, P. Kalmbach, A. Blenk and W. Kellerer. A mathematical framework for measuring network flexibility. *Computer Communications*. 2020. Vol. 164, pp. 13–24.
6. F. Rahman. Save the world versus man-made disaster: A cultural perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 235, 012071.
7. Mohamed H. A. R. A Proposed Model for IT Disaster Recovery Plan. *Ijmecs*. 2014. Vol. 6, No. 4, pp. 57–67. DOI: 10.5815/ijmecs.2014.04.08
8. Weather and Climate Services in Europe and Central Asia. A Regional Review / World Bank Working Paper No. 151. Washington, D.C., 2008. 79 p.
9. Zhuravel A.S., Kravchuk S.O. Wireless access networks with dynamic spectrum selection // *Mater. 11th International science and technology conf. "Problems of telecommunications"*, April 18–21, 2017 - K.: Khimgest, 2017. - P. 172–174.
10. Anakhov P., Zhebka V., Bondarchuk A., Storchak K., Sablina M. Increasing the Reliability of a Heterogeneous Network using Redundant Means and Determining the Statistical Channel Availability Factor / *CEUR Workshop Proceedings* This link is disabled., 2023, 3421, p. 231–236
11. Anakhov P., Zhebka V., Popereshnyak S., Skladannyi P., Sokolov V. Protecting Objects of Critical Information Infrastructure from Wartime Cyber Attacks by Decentralizing the Telecommunications Network / *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, 3550, p. 240–245