

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Одарченко Роман Сергійович

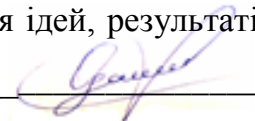
УДК 621.396 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____



Науковий консультант:

Мачалін Ігор Олексійович

доктор технічних наук, професор,

декан Факультету аеронавігації, електроніки
та телекомунікацій

Національного авіаційного університету

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Одарченко Р.С. Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі». – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Створення інформаційного суспільства в Україні є одним із найактуальніших завдань сьогодення. В Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні до пріоритетів формування сучасної інформаційної інфраструктури країни віднесено створення високошвидкісних мереж ширококутового мобільного доступу до ресурсів мережі Інтернет на всій території України.

Виходячи з вищесказаного, можна стверджувати, що розвиток інфраструктури ширококутового доступу до ресурсів мережі Інтернет на всій території України на базі створення високошвидкісних мереж четвертого та п'ятого поколінь і підвищення ефективності їх функціонування є задачею актуальною та перспективною. При цьому під ефективністю будемо вважати множину $W = \{W_C, W_T, W_E\}$, де W_C – цільова ефективність (кількісна міра оцінки відповідності мережі своєму призначенню), W_T – технічна ефективність (кількісна міра, яка відображає технічну довершеність мережі) та W_E – економічна ефективність (кількісна міра економічної доцільності функціонування мережі). Науково обґрунтоване планування й оптимізація стільникових мереж, які забезпечують надання запитуваних послуг із заданими показниками ефективності функціонування, є дуже складною науково-технічною й економічною проблемою, без вирішення якої неможливе створення інформаційної інфраструктури, що відповідає потребам розвинутого інформаційного суспільства.

Тому дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми створення методології підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку на основі розроблених теоретичних методів, моделей та алгоритмів.

Аналіз якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж LTE в світі та стільникових мереж 4G в Україні дозволив встановити, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів (цільова ефективність) перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування радіомереж, транспортних підсистем, методів керування та забезпечення кібербезпеки. Тому у роботі було отримано ряд наукових результатів, спрямованих на підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку.

Удосконалено метод планування мережі стільникового оператора, що дозволило проводити більш точну оцінку зон радіопокриття, вибір ключових показників якості обслуговування, більш ефективне частотне планування та розрахунок капітальних витрат, що надає змогу операторам оцінити доцільність побудови варіанту мережі стільникового зв'язку.

Розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж, який на відміну від відомих, дозволяє проводити оцінку найбільш важливих показників ефективності функціонування та захищеності мережі стільникового оператора з метою їх постійного контролю та оптимізації під час впровадження нових сервісів під час обслуговування абонентів.

Розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора. Запропонований метод дозволяє при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, що дозволяє мінімізувати необхідну кількість базових станцій для побудови мережі, а тому майже в 2 рази зменшити витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій, тобто підвищити економічну ефективність мережі.

Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора з використанням підмережі стандарту не-3GPP. Запропоновані удосконалення дозволяють зменшити навантаження на радіоінтерфейс мережі стільникової мережі до допустимого рівня, вдвічі збільшити кількість активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечити балансування навантаження та підвищення ефективності функціонування радіопідмережі.

Розроблений метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі дозволяє здійснити удосконалення структури транспортної мережі при переході до мереж нових поколінь, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та підвищення економічної ефективності транспортної мережі. Зокрема, запропонований метод дозволяє підвищити економічну ефективність транспортної мережі до 10%.

Удосконалено метод маршрутизації з резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки, що дозволяє, надаючи підвищений рівень надійності та захищеності мережі, підвищити ефективність функціонування транспортних каналів, зокрема, збільшити їх утилізацію до 70-80%.

Розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі. Запропонований метод дозволяє проводити більш гнучке та оперативне розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних до 2,1 раза для ієрархічної структури.

Розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, що дозволяє в режимі реального часу проводити моніторинг стану забезпечення кібербезпеки, підвищувати її рівень та ефективність функціонування стільникової мережі.

На базі розроблених та удосконалених методів було розроблено методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі

стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi (Wireless Fidelity), методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мереж, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, що на відміну від відомих, надає можливість за рахунок безперервного моніторингу ключових показників якості функціонування мережі оперативно підвищувати ефективність функціонування стільникової мережі та якість обслуговування абонентів.

Вище окреслені теоретичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, відкривають можливість виявити і запропонувати нові практичні шляхи підвищення ефективності функціонування мереж стільникових операторів під час їх впровадження та удосконалення в Україні на основі використання удосконалених підходів до планування мереж, удосконаленню механізмів забезпечення безпеки, методів оптимізації підсистеми базових станцій, транспортних сегментів, керування мережею та резервування обладнання та каналів зв'язку.

При цьому отримані результати дозволяють: підвищувати ефективність планування розміщення базових станцій із використанням уточнюючих факторів; оцінювати рівень завантаженості радіоінтерфейсу та транспортної мережі стільникового оператора з метою підвищення ефективності їх функціонування; вибирати оптимальні показники ефективності функціонування мережі стільникового оператора; проводити оптимізацію параметрів мережі

стільникового оператора; проводити більш ефективне керування мережею стільникового оператора; запроваджувати нові сервіси для використання в стільниковій мережі; проводити розвантаження радіоінтерфейсу стільникової мережі; забезпечувати резервування ресурсів транспортної мережі; проводити попередню оцінку вартості проектного рішення мережі LTE.

При цьому практична цінність дисертаційної роботи полягає в такому: розроблено методику безперервної оптимізації ефективності функціонування мережі стільникового оператора; розроблено методику планування радіопокриття мережі стільникового оператора; розроблено методику вибору сучасних технічних рішень, а також специфікації у галузі уніфікованих комунікацій, побудованих за технологією IMS/A-IMS для побудови загальнодержавної мережі; розроблені удосконалені алгоритми розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж із використанням технологій Wi-Fi, Li-Fi (Light Fidelity) та концепції SDN; розроблено відповідне алгоритмічне і програмне забезпечення для оцінки вартості мережі стільникового зв'язку; розроблено програмне забезпечення для оцінки показників KPI та KQI мережі стільникового оператора; розроблено навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіопокриття базових станцій мережі LTE; розроблено програмне забезпечення для оцінки показників якості обслуговування кінцевих вузлів в концепції IoE (Internet of Everything); розроблено структуру багатоканального шлюзу для мереж 5G; розроблено імітаційну модель мережі SDN.

Матеріали дисертаційної роботи упроваджено у діяльність ТОВ «М.М.Д Смарт Україна», ТОВ «Українські новітні технології» (ТМ «Freshtel»), Bundleslab KFT (Угорщина), Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації, навчальний процес Університету в Бельсько-Бялій, Національного авіаційного університету, Державного закладу «Київський коледж зв'язку» та Центру перепідготовки та підвищення кваліфікації Київської обласної державної адміністрації.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час планування безпроводових мереж стандарту LTE та 5G, розробки обладнання та програмного забезпечення для систем передачі даних, а також в навчальному процесі.

Ключові слова: стільникова мережа, підсистема базових станцій, планування, транспортна мережа, LTE, ефективність, балансування навантаження, пропускна здатність, резервування, захищеність.

ABSTRACT

Odarchenko R.S. Cellular networks efficiency improving methodology. - As a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.12.02 - Telecommunication systems and networks. National Aviation University, Kyiv, 2019.

The amount of traffic carried over wireless networks is growing rapidly and is being driven by many factors. Chief among them is the tremendous growth in multimedia applications on mobile devices – streaming music and video, two-way video conferencing and social networking to name a few. The telecoms industry is undergoing a major transformation towards 5G networks in order to fulfil the needs of existing and emerging use cases. The 5G architecture should seamlessly support both fixed and mobile access technologies under a fully converged end-to-end system in order to deliver future service requirements for some of the deployment scenarios that could be supported. This technologies in nearest future have come to Ukraine too.

Based on the foregoing, it can be argued that the development of the infrastructure of broadband access to the Internet resources throughout the territory of Ukraine on the basis of the creation of high-speed networks of the fourth and fifth generations and increasing the efficiency of their functioning is an urgent and promising task. At the same time, we will consider the efficiency of the set where - the target efficiency (quantitative measure of the conformity of the network to its

purpose), technical efficiency (quantitative measure, reflecting the technical perfection of the network), and economic efficiency (quantitative measure of the economic feasibility of network operation). Scientifically grounded planning and optimization of cellular networks, which ensure the provision of the requested services with specified performance indicators, is a very complicated scientific and technical and economic problem, without which it is impossible to create an information infrastructure that meets the needs of a well-developed information society.

That's why in this dissertation an analysis of the quality of service of subscribers of cellular networks in Ukraine was conducted in order to determine the efficiency of their operation and security. An analysis of the quality of customer service in the implemented projects of LTE networks in the world and 4G networks in Ukraine has established that the claimed requirements for fourth generation networks are not achieved in any of the implemented networks, and the actual quality of customer service (target efficiency) is at a rather low level which indicates the low efficiency of existing radio network planning methods, transport subsystems, control and cybersecurity management methods. This made it possible to determine the directions by which it is necessary to increase the efficiency of the operation of cellular networks.

In this dissertation were developed several methods to improve network efficiency. The method of planning of the network of the cellular operator enables cellular operators to more accurately assess the coverage of radio coverage areas, choose key indicators of service quality, more efficient frequency planning and capital cost calculation, which in turn allows us to assess the feasibility of constructing a cellular network option. On the basis of this advanced method, a training software (web-application) was developed to evaluate radio coverage zones of LTE network base stations. The method for evaluating key indicators of service quality, the level of information security and the efficiency of cellular networks makes it possible to assess the most important indicators of the quality of functioning and security of the cellular network network in order to continuously monitor and

optimize them when introducing new services during customer service. The method for optimizing the subsystem of base stations allows to increase the radius of subscriber service areas of cellular networks, which allows minimizing the number of base stations for network construction, and therefore reduce the cost of the cellular operator to build the subsystem of the base stations, that is, increase the economic efficiency of the network. Improved method of the radio interface off-loading using a non-3GPP standard subnet allow to reduce the load on the radio interface of the network of the cellular network to an acceptable level, double the number of active subscribers, which are served in the cell, and provide load balancing and increase the efficiency of the radio subnetwork. The method of optimization of a multi-level transport segment of a cellular network has been developed, which allows to improve the structure of the transport network during the transition to new generations networks, providing the necessary capacity and increasing and improving the efficiency of the transport network. The method of routing with resource reservation and balancing of the traffic of a cellular operator with the consideration of information security requirements allows to increase the efficiency of the transport channels usage.

The method for evaluating the effectiveness of a software-configured network allows for a more flexible and operational expansion of the network, the introduction of new services, increasing the efficiency of data delivery for the hierarchical structure.

The method of network-centric monitoring and response to cyber incidents in the network of the cellular network allows real-time monitoring of the state of cyber security, its level and, consequently, the efficiency of the cellular network.

On the base of these methods in this dissertation was developed cellular networks efficiency improving methodology, which is using the improved method of LTE network planning, the key method for assessing performance of the cellular operator for the purpose of continuous operator network optimizing using the method of base station subsystem optimization, improved method of radio interface of the cellular operator offloading using Wi-Fi, the method of optimization of multi-vehicle

segment of the cellular network, the method of roaming with resource reservation and load balancing of mobile operator and method of SDN network effectiveness evaluation.

Using the developed methodology mobile operators can improve the efficiency of their networks by increasing the radius of the service areas, minimizing the required number of base stations for the construction of the network, doubling the number of active subscribers in the cell and provide load balancing in transport and radio network, increase transport network efficiency, enhance network reliability, optimize utilization of transport channels for a more flexible and rapid network expansion, introduction of new services and improved data delivery in the hierarchical structure of SDN.

At the same time, the obtained results allow: to increase the effectiveness of planning the deployment of base stations using refinement factors; to estimate the level of load of the radio interface and the transport network of the cellular operator in order to increase their efficiency; choose the optimal performance indicators of the cellular operator network; to optimize the parameters of the cellular operator network; to conduct more efficient management of the network of the cellular operator; introduce new services for use in the cellular network; to unload the radio interface of the cellular network; to provide reserve of resources of the transport network; carry out a preliminary assessment of the cost of the LTE network design solution.

In this case, the practical value of the dissertation work is as follows: the method of continuous optimization of the efficiency of the operation of the cellular operator network is developed; the method of planning of radio coverage of a network of a cellular operator is developed; the technique of choosing modern technical solutions, as well as specifications in the field of unified communications, built on the technology IMS / A-IMS for the construction of a nation-wide network, has been developed; Improved algorithms for unloading the radio interface of cellular networks using Wi-Fi, Li-Fi (Light Fidelity) and SDN concepts; appropriate algorithmic and software for estimating the value of a cellular network; software for

evaluating KPI and KQI of a cellular operator network; educational engineering software (web-application) was developed for estimation of radio coverage zones of LTE network base stations; software for evaluating the quality of service of end nodes in the Internet (Internet of Everything); the structure of the multichannel gateway for networks 5G was developed; the simulation model of the SDN network is developed.

The materials of the dissertation work were introduced into the activities of LLC MMD Smart Ukraine, LLC "Ukrainian New Technologies" (TM "Freshtel"), Bundleslab KFT (Hungary), State Research Institute of Special Communications and Information Protection, educational the process of the University in Bielsko-Biali, the National Aviation University, the Kyiv-based Communications College and the Kyiv Regional State Administration's Retraining and Upgrading Center.

It is advisable to use the obtained scientific results when planning LTE and 5G wireless networks, developing equipment and software for data transmission systems, as well as in the learning process.

Key words: cellular network bandwidth, software-configured network, power radio signal attenuation, the transport network, optimization, probability of bit error, delay.

Список основних публікацій здобувача:

1. Odarchenko R., Al Hadidi, M., Al-Azzeh, J.S., Gnatyuk S., Abakumova A. Adaptive regulation of radiated power radio transmitting devices in modern cellular network depending on climatic conditions. *Contemporary Engineering Sciences*. 2016. Vol. 9, №10. P. 473-485. (*Scopus*)
2. R. Odarchenko Analysis of self-similar traffic models in computer networks /R. Odarchenko and others. *International Review on Modelling and Simulations*. 2018. Vol.10, №5. P. 328-336.
3. Hadidi M.A., Al-Azzeh J.S., Tkalich O.P., Gnatyuk S.O., Khokhlachova Y.Y. Zigbee, bluetooth and Wi-Fi complex wireless networks performance increasing. *International Journal on Communications Antenna and Propagation*. 2017. №7(1). P. 48-56. (*Scopus*)

4. Roman Odarchenko, Baruch Altman, Rui Aguiar and Yevgeniya Sulema. Multilink Approach for the Content Delivery in 5G Networks: Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications. Science and Technology(PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. P.140-144. (*Scopus*)
5. Improved Method of Routing in UAV Network / R. Odarchenko, S. Gnatyuk, T. Zhmurko, O. Tkalich. Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (APUAVD), Kyiv, Ukraine, October 13-15, 2015. Vol. 1. P. 294-297. (*Scopus*)
6. OFDM signal formation with adaptive guard interval duration change/R. Odarchenko, O. Tkalich, Z Shevchuk, S. Lukin. Proceedings of the Second International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) , Kharkiv, Ukraine, October 13-15, 2015. – P. 216-219. (*Scopus*)
7. Research of energy characteristics of QAM modulation techniques for modern broadband radio systems / O. Solomentsev, M. Zaliskyi, R. Odarchenko, S. Gnatyuk. Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT), Odessa, Ukraine, May 23-27, 2016. P. 14-20. (*Scopus*)
8. Traffic offload improved method for 4G/5G mobile network operator / R. Odarchenko, A. Abakumova, O. Polihenko, S. Gnatyuk. Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 – Proceedings 2018-April, P. 1051-1054. (*Scopus*)
9. Estimation and reduction of the climatic conditions influence on the radio signal propagation in the troposphere / R. Odarchenko, N. Dyka, G. Konakhovych, A. Abakumova and others. Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 10-13, 2017. P. 45-48. (*Scopus*)

10. Mobile operators base station subsystem optimization method / R. Odarchenko, N. Dyka, O. Poligenko, L.Kharlai, A. Abakumova. Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 10-13, 2017. – P. 29-33. (*Scopus*)

11. Transport network optimization methods of mobile operators in Ukraine / R. Odarchenko, Y. Kochergin, A. Abakumove, D. Vergeles. Proceedings of the 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON, Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June 2017. P. 1107-1112.

12. Evaluation of SDN network scalability with different management level structure /R. Odarchenko, O. Tkalich, G. Konakhovych, A. Abakumova. Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 4-6, 2016. P. 128-131. (*Scopus*)

13. LTE and wireless sensor networks integration in the concept of "smart home / R. Odarchenko, O. Tkalich, A. Abakumova, O. Ustinov. Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, Kyiv, Ukraine, October 18-20, 2016. P. 35-38. (*Scopus*)

14. Software-Controlled Network SDN Reliability Calculation/ R. Odarchenko, S. Dakov, O. Oksiuk, L. Dakova. Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. P 99-103. (*Scopus*)

15. Estimation of the communication range and bandwidth of UAV communication systems / R. Odarchenko, O. Polihenko, L. Kharlai, O. Tkalich. Proceedings of the 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kyiv, Ukraine, October 17-19, 2017. P. 159-162. (*Scopus*)

16. Signal constructions with low resultant sidelobes for pulse compression navigation and radar systems /R. Odarchenko, A. Holubnychy, G. Konakhovych. Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of

Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, October 18-20, 2016. P. 267-270. (*Scopus*)

17. Security key indicators assessment for modern cellular networks /R. Odarchenko, V. Gnatyuk, S. Gnatyuk, A. Abakumova. Proceedings of the 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, (SAIC 2018), Kiev, Ukraine, October 8-12, 2018. P. 267-270. (*Scopus*)

18. Method of traffic monitoring for DDoS attacks detection in e-health systems and networks / R. Odarchenko, M. Zaliskiy, S. Gnatyuk, Y Petrova, A. Chaplits. CEUR Workshop Proceedings, Lviv, Ukraine, November 28-30, 2018. P. 193-204. (*Scopus*)

19. Одарченко Р.С. Удосконалений метод планування мереж LTE. Наукоемкие технологии в инфокоммуникациях: обработка информации, кибербезопасность, информационная борьба: Монография / под общей редакцией В. М. Безрука, В. В. Баранника. Х. : Издательство «Лидер», 2017. С. 106-123.

20. Удосконалена архітектура системи безпеки стільникових мереж нового покоління / Р.С.Одарченко, В.О. Гнатюк В.О., Є.О.Самойлик, В.В. Котелянець. Наукоемні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія / за ред. В. В. Баранніка, В. М. Безрука. Х.: Видавництво «Стиль-видат», 2018. С. 293-302.

21. Одарченко Р.С. Стратегії розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні. *Наукоемні технології*. 2014. Вип. 2, т. 26. С. 141-148.

22. Одарченко Р.С. Обґрунтування основних вимог до систем безпеки стільникових мереж 5-го покоління. *Безпека інформації*. 2015. №3, т.21. С.102-106.

23. Одарченко Р.С. Концепція сенсорної мережі збору метеорологічних даних для системи регулювання випромінюваної потужності радіопередавальних пристроїв стільникових мереж. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2013. Вип. 8. С. 53-61.

24. Одарченко Р.С. Розробка структури системи моніторингу та оптимізації мережі стільникового оператора. *Наукоємні технології*. 2017. №3(35). С.197-203.
25. Одарченко Р.С. Програмне забезпечення для попередньої оцінки вартості мережі LTE. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. Вип.3(51). С. 1-6.
26. Одарченко Р.С., Скульська О.Ю., Гнатюк В.О. Метод оцінки ключових показників захищеності в сучасних стільникових мережах. *Безпека інформації*. 2017. № 1(23). С. 19-26.
27. Одарченко Р. С., Абакумова А. О., Дика Н. В. Дослідження вимог до стільникових мереж нового покоління та можливості їх розгортання в Україні. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. №54. т.2. С. 52-59.
28. Дослідження основних недоліків базових станцій різних поколінь стільникового зв'язку / Р. С. Одарченко та ін. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2016. №3. С. 81-89
29. Програмне забезпечення для оцінки ключових показників якості обслуговування зі сторони абонента стільникової мережі / Р. С. Одарченко та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. №3(59). С. 56-61.
30. Одарченко Р.С., Конахович Г.Ф., Ткаченко В.В. Методика вибору проектного рішення для розгортання захищеної мережі LTE . *Захист інформації*. 2014. № 1 (16). С. 63-68.
31. Одарченко Р.С., Мирутенко Л.В., Даков С.Ю. Удосконалений метод побудови опорного сегменту мережі LTE. *Наукоємні технології*. 2018. №1(37). С.18-26.
32. Одарченко Р.С., Харлай Л.О. Метод резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі з урахуванням основних характеристик мереж. *Технічні науки та технології*. 2018. №1(11). С. 89-96.
33. Одарченко Р.С., Коберник А.Ю., Федюра Т.В. Дослідження архітектури сучасних систем моніторингу в мережах стільникового зв'язку. *Наукоємні технології*. 2018. №2(38). С. 195-202.

34. Розробка системи управління кіберінцидентами в мережах LTE / Р. С. Одарченко та ін. *Безпека інформації*. 2018. № 2. т.24. С. 84-90.
35. Одарченко Р.С., Гнатюк В.О. Концептуальні засади підвищення рівня кібербезпеки сучасних стільникових мереж. *Захист інформації*. 2016. Вип. 22 (2). С. 143-149.
36. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Стецюра Ю.І. Розвантаження радіоінтерфейсу мережі LTE шляхом застосування концепції Hotspot 2.0 *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. Житомир: ЖВІ ДУТ. 2014. Вип.17. С.63-70.
37. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П. Використання концепції мереж SDN для розподілу трафіку між мережами LTE та Wi-Fi. *Наукоємні технології*. 2014. Вип.4 (24). С.432-437.
38. Моделювання роботи overlay мереж SDN та дослідження їх основних характеристик / Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 284-290.
39. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Креденцар С.М. Програмне забезпечення для оцінювання пропускної здатності MIMO-системи. *Наукоємні технології*. 2013. Вип. 4. С. 384-389
40. Підвищення ефективності використання корпоративної мережі за концепцією BYOD / Р. С. Одарченко та ін. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. Житомир: ЖВІ НАУ. 2013. Вип.7. С. 57-67.
41. Одарченко Р.С., Полігенько О.О., Ткаліч О.П. Експериментальні дослідження пропускної здатності мереж стандарту IEEE 802.11n. *Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць*. Київ, 2013. Вип.4 (44). С. 61-69.
42. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Вітковський Я.І. Інтеграція сервісів місця розташування мобільних абонентів з системою відеоспостереження. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. № 48, т.4. С.56-62.

43. Одарченко Р.С., Гнатюк С.О., Ткаліч О.П. Архітектура сучасної захищеної інформаційно-комунікаційної мережі аеропорту. *Захист інформації*. 2015. №3, т.17. С. 240-246.

44. Розрахунок зони покриття бездротової мережі Wi-Fi для визначення місцезнаходження абонентів в аеропорту / Р. С. Одарченко та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. Т. 2. Вип. 50. С. 117-122.

45. Оцінка адекватності моделей розповсюдження для їх використання під час визначення місцезнаходження абонентів/ Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології*. 2015. Вип. 2 (26). С. 159-165.

46. Одарченко Р. С., Дика Н. В. Дослідження архітектури мереж стільникового зв'язку в Україні та можливостей їх переходу до мереж LTE. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 291-298.

47. Одарченко Р.С. Пробита Д.М., Третяк І.В. Основні засади функціонування технології Li-Wi в концепції IoT. *Наукоємні технології*. 2017. №2(34). С.107-113.

48. Дослідження вразливостей сенсорних підмереж архітектури Інтернету речей до різних типів атак / Р. С. Одарченко та ін. *Безпека інформації*. 2016. №1, т. 22. С. 12-19.

49. Аналіз загроз та механізмів забезпечення інформаційної безпеки в сенсорних мережах / Р. С. Одарченко та ін. *Захист інформації*. 2016. №1, т.18. 48-56.

50. Одарченко Р.С., Даков С.Ю. Метод проектування SDN-мережі операторського класу. *Наукоємні технології*. 2017. №4(36). С. 289-295.

ЗМІСТ

ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ЗАХИЩЕНОСТІ СУЧАСНИХ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ	41
1.1. Аналіз типових архітектурних рішень для побудови мереж стільникового зв'язку	42
1.1.1. Розвиток стільникових мереж в Україні.....	42
1.2. Аналіз архітектури та основних характеристик стільникових мереж LTE	44
1.2.1. Основні характеристики мереж LTE	45
1.2.2. Дослідження мережі LTE-Advanced	47
1.3. Аналіз показників ефективності функціонування стільникових мереж ...	52
1.3.1. Оцінка ефективності функціонування стільникових мереж в Україні	52
1.4. Аналіз механізмів забезпечення захищеності сучасних стільникових мереж	57
1.5. Формування та аналіз вимог до стільникових мереж нового покоління ..	60
1.5.1. Вимоги до ефективності функціонування стільникових мереж	60
1.5.2. Вимоги до систем безпеки стільникових мереж.....	71
1.6. Дослідження недоліків архітектурних рішень стільникових мереж	77
1.6.1. Недоліки підсистеми базових станцій	77
1.6.2. Аналіз напрямів удосконалення транспортних мереж	80
1.7. Дослідження основних напрямків підвищення ефективності стільникових мереж та постановка задач дослідження	82
Висновки до розділу 1	85
Список використаних джерел у першому розділі.....	87

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ МЕРЕЖ ОПЕРАТОРІВ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	99
2.1. Розробка стратегії розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні ..	99
2.2. Удосконалений метод планування мережі LTE.....	109
2.2.1. Формування вибірки вхідних даних	110
2.2.2. Побудова початкового наближення мережі LTE.....	114
2.2.3. Методика оцінки бюджету втрат і зони покриття	115
2.2.4. Частотне планування мережі LTE.....	122
2.3. Побудова опорного сегменту.....	126
2.4. Оптимізація основних параметрів мережі.....	127
2.5. Метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж	128
2.5.1. Класифікація послуг стільникового оператора.....	130
2.5.2. Вибір ключових показників якості надання послуг та продуктивності мережі.....	136
2.6. Програмне забезпечення для побудови стільникової мережі та оцінки інвестиційних витрат	144
Висновок до розділу 2.....	149
Список використаних джерел у другому розділі.....	151
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА.....	155
3.1. Модель підсистеми базових станцій мобільного оператора	155
3.2. Удосконалення підсистеми базових станцій.....	162
3.2.1. Використання SDR.....	162
3.2.2. Використання активних антен для оптимізації базових станцій	164
3.2.3. Використання мультистандартних антен для оптимізації БС.....	164

3.2.4. Використання антен з електричним азимутом для оптимізації базових станцій.....	166
3.2.5. Моделювання рівня прийнятого сигналу та зони обслуговування базової станції.....	167
3.2.5.1. Параметри, що впливають на якість з'єднання	167
3.2.5.2. Розрахунок рівня прийнятого сигналу.....	173
3.2.5.3. Розрахунок площі покриття.....	176
3.3. Метод розвантаження радіоінтерфейсу базових станцій стільникового оператора.....	178
3.3.1. Модель розвантаження радіоінтерфейсу.....	178
3.3.2. Алгоритми розвантаження.....	180
3.3.3. Удосконалення архітектури мереж 5G для забезпечення багатоканальної передачі даних	184
Висновки до розділу 3	187
Список використаних джерел у третьому розділі	188
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА.....	193
4.1 Транспортна мережа LTE.....	194
4.2. Методика вибору оптимальної технології транспортної мережі.....	196
4.3. Метод оптимізації багатошарової структури мережі.....	200
4.3.1. Модель оптимізації транспортної мережі оператора стільникового зв'язку.....	200
4.3.2. Дослідження моделі.....	208
4.4. Метод маршрутизації із резеруванням ресурсів, балансуванням навантаження та забезпечення інформаційної безпеки	212
Висновки до розділу 4	218
Список використаних джерел в четвертому розділі.....	219

РОЗДІЛ 5 МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕЮ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА.....	222
5.1. Архітектура мобільної мережі з використанням SDN та SDR.....	222
5.2. Використання SDN для побудови транспортної мережі з застосуванням OTS	223
5.3. Оцінка ефективності мереж SDN	227
5.3.1. Узагальнена модель оцінки ефективності мережі SDN.....	227
5.3.2. Підходи до побудови архітектури рівня управління.....	230
5.3.3. Модель архітектури SDN	233
5.3.4. Оцінка масштабованості рівня управління SDN	239
5.3.5. Оцінка середньої затримки пакета в мережах SDN	244
Висновки до розділу 5	248
Список використаних джерел у п'ятому розділі	249
РОЗДІЛ 6 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ПЕРЕДАВАНИХ ДАНИХ В СТІЛЬНИКОВІЙ МЕРЕЖІ НОВОГО ПОКОЛІННЯ.....	253
6.1. Удосконалення архітектури системи безпеки стільникових мереж нового покоління.....	254
6.2. Схема реалізації концепції мережецентричного моніторингу кіберінцидентів в стільниковій мережі.....	265
6.3. Метод оцінки ключових показників захищеності в стільникових мережах	269
6.4. Концепція само-керованих систем забезпечення мережевої безпеки	278
6.5. Удосконалений метод виявлення аномалій в безпроводовій мережі	280
Висновки до розділу 6	281
Список використаних джерел у шостому розділі.....	283
РОЗДІЛ 7	286
МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА	286
7.1. Моделювання роботи мережі радіодоступу стільникового оператора ...	286

7.1.1. Узагальнене налаштування та первинні вимірювання	286
7.1.2. Моделювання покриття однієї базової станції	288
7.1.3. Моделювання покриття кластеру базових станцій	293
7.2. Оцінка виграшу від розвантаження радіоінтерфейсу	299
7.3. Моделювання балансування навантаження	307
7.4. Моделювання роботи SDN мережі.....	313
7.4.1. Централізована структура рівня управління.....	314
7.4.2. Глобальна децентралізована структура рівня управління.....	316
7.4.3. Локальна децентралізована структура рівня управління	317
7.5. Моделювання кібератак та їх виявлення в мережі	318
7.6. Вимірювання параметрів мережі стільникового оператора	322
Висновки до розділу 7	325
Список використаних джерел у сьомому розділі	326
РОЗДІЛ 8 МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ.....	327
8.1. Розроблена методологія.....	327
8.2. Система моніторингу та оптимізації стану стільникової мережі.....	329
Висновки до розділу 8	339
Список використаних джерел у восьмому розділі	340
ВИСНОВКИ.....	344
ДОДАТОК А КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ЗАХИЩЕНОСТІ.....	349
ДОДАТОК Б РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ АБОНЕНТІВ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ.....	359
ДОДАТОК В ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ КЛЮЧОВИХ ПОКАЗНИКІВ СТАНУ МЕРЕЖІ	361

ДОДАТОК Д ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ	364
ДОДАТОК Е ПРОЦЕДУРИ ВСТАНОВЛЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ В МЕРЕЖІ 5G.....	374
ДОДАТОК Є АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	376

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

4G	від англ. Generation – покоління
BSS	Підсистема базових станцій (англ. Base Station Subsystem)
BTS	Базова станція (англ. Base Transceiver Station)
BYOD	Концепція "Bring Your Own Device"
CERT	Група реагування на комп'ютерні інциденти (англ. Computer Emergency Response Team)
CN	Ядро мережі (англ. Core Network)
DL	Передача даних в напрямку до абонента (англ. Downlink)
DoS	Відмова в обслуговуванні (англ. Denial of Service)
eNB	Покращений вузол B (англ. Evolved Node B)
EPC	Покращене ядро пакетної мережі (англ. Evolved Packet Core Network)
E-UTRAN	Удосконалений радіоінтерфейс LTE (англ. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network)
FDD	Дуплексування з частотним розподілом (англ. Frequency Division Duplex)
GPS	Система глобального позиціонування (англ. Global Positioning System)
HTTP	Протокол передачі гіпертексту (англ. HyperText Transfer Protocol)
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Концепція Інтернету речей (англ. Internet of Things)
IP	Протокол міжмережної взаємодії (англ. Internet Protocol)
ISO	Міжнародна організація по стандартизації (англ. International Standard Organization)
KPI	Ключові показники продуктивності (англ. Key Performance Indicator)
KQI	Ключові показники якості (англ. Key Quality Indicator)
LTE	Назва мобільного протоколу передавання даних (англ. Long Term

	Evolution)
MIMO	Системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами (англ. Multiple Input Multiple Output)
ML	Технологія багатоканальної передачі даних (англ. Multilink)
MSC	Мобільний центр комутації (англ. Mobile Switching Center)
MTCP	Протокол багатоканальної надійної передачі даних (англ. Multipath TCP)
NFV	Віртуалізація мережевих функцій (англ. Network Function Virtualization)
NR	Технологія нового радіоканалу мереж 5G (англ. New Radio)
OTN	Оптична транспортна мережа (англ. Optical transport network)
OTS	Оптичний транспортний комутатор (англ. Open Transport Switches)
OXC	Оптична кроскомутація (англ. Optical cross-connect)
QAM	Квадратурна амплітудна модуляція (англ. Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	Якість обслуговування (англ. Quality of Service)
QPSK	Квадратурна фазова модуляція (англ. Quadrature Phase Shift Keying)
RAN	Мережа радіодоступу (англ. Radio Access Network)
SAE	Еволюція системної архітектури LTE (англ. System Architecture Evolution)
SCTP	Протокол передачі з керуванням потоком (англ. Stream Control Transmission Protocol)
SDN	Програмно-керовані мережі (англ. Software Defined Networks)
SDR	Програмно-кероване радіо (англ. Software Defined Radio)
SLA	Договір щодо якості обслуговування (англ. Service Level Agreement)
TCP	Протокол транспортного рівня мережі OSI (англ. Transmission Control Protocol)

TDM	Мультиплексування з часових розподілом (англ. Time Division Multiplexing)
UE	Обладнання користувача (англ. User Equipment)
UL	Передача даних в напрямку від абонента (англ. Uplink)
USIM	Універсальний модуль ідентифікації мобільного абонента (англ. Universal Subscriber Identity Module)
VoIP	Передача голосу по протоколу IP (англ. Voice over IP)
Wi-Fi	Сімейство стандартів безпроводових мереж IEEE 802.11 (англ. Wireless Fidelity)
БС	Базова станція
ВВП	Валовий внутрішній продукт
ВСШ	Відношення сигнал/шум
ІБ	Інформаційна безпека
ІТ	Інформаційні технології
КБІ	Кіберінцидент
КЗ	Канал зв'язку
ККД	Коефіцієнт корисної дії
КУВ	Кількість успішних викликів
МО	Мобільний оператор
МСЕ	Міжнародний союз електрозв'язку
МЦ	Мережецентричний
РІБ	Ризик інформаційної безпеки
РРС	Радіорелейна станція
РЧС	Радіочастотний спектр
СМО	Система масового обслуговування

ВСТУП

Актуальність теми. Створення інформаційного суспільства в Україні є одним із найактуальніших завдань сьогодення. В Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні до пріоритетів формування сучасної інформаційної інфраструктури країни віднесено створення високошвидкісних мереж широкосмугового мобільного доступу до ресурсів мережі Інтернет на всій території України. Йдеться про широкосмуговий доступ на базі використання технологій мобільного зв'язку четвертого покоління 4G (від англ. Generation – покоління) та 5G в найближчому майбутньому. На вирішення питань щодо впровадження 4G технологій на території України спрямовано зусилля найбільших операторів стільникового зв'язку (Київстар, Vodafone та Lifecell). При цьому вплив цих технологій на сучасне суспільство переоцінити неможливо. Стільниковий зв'язок розглядається в даний час як норма, а технології мобільного зв'язку є найбільш затребуваними і тими, що швидко розвиваються.

Стандарт 4G здатний забезпечувати швидкості передачі даних на рівні понад 100 Мбіт/с швидкорухомим абонентам (наприклад, потягам і автомобілям) та 1 Гбіт/с абонентам з невеликою рухливістю (наприклад, пішоходам і фіксованим абонентам) згідно з міжнародною специфікацією International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced). Мережі 5G взагалі будуть здатні використовувати можливості всіх запущених стільникових мереж попередніх поколінь одночасно разом із новим радіоінтерфейсом New Radio (NR). Україні, щоб якнайшвидше інтегруватися в світовий інформаційний простір, необхідно терміново удосконалювати інфраструктуру вже запущених мереж, а також розгортати нові, побудовані у відповідності до найсучасніших стандартів.

Виходячи з вищесказаного, можна стверджувати, що розвиток інфраструктури широкосмугового доступу до ресурсів мережі Інтернет на всій території України на базі створення високошвидкісних мереж четвертого та п'ятого поколінь і підвищення ефективності їх функціонування є задачею

актуальною та перспективною. При цьому під ефективністю будемо вважати множину $W = \{W_C, W_T, W_E\}$, де W_C – цільова ефективність (кількісна міра оцінки відповідності мережі своєму призначенню), W_T – технічна ефективність (кількісна міра, яка відображає технічну довершеність мережі) та W_E – економічна ефективність (кількісна міра економічної доцільності функціонування мережі). Науково обґрунтоване планування й оптимізація стільникових мереж, які забезпечують надання запитуваних послуг із заданими показниками ефективності функціонування, є дуже складною науково-технічною й економічною проблемою, без вирішення якої неможливе створення інформаційної інфраструктури, що відповідає потребам розвинутого інформаційного суспільства. Таким чином, тема дисертаційної роботи є дуже актуальною.

Поряд із зростанням кількості різномірних пристроїв, підключених до мережі Інтернет, та новими популярними сервісами (передача відео з високою роздільною здатністю 4K, 8K, віртуальна реальність (Virtual Reality – VR), доповнена реальність (Augmented Reality – AR), концепція Connected Cars тощо), що висувають нові вимоги до цільової ефективності функціонування стільникових мереж (зменшення затримки, збільшення необхідної пропускну здатності тощо), в світі відбувається експоненціальне зростання кількості передавання даних, з яким не завжди здатні ефективно впоратись існуючі стільникові мережі 4G. Очевидно, що вже в найближчому майбутньому існуючі мережі будуть нездатними забезпечити необхідну якість обслуговування мобільних абонентів, автомобілів та пристроїв IoT.

Для належної підтримки нових широкосмугових технологій радіодоступу в сучасних стільникових мережах повинна бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та забезпеченні якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку. Таким чином, з метою оптимізації вже існуючих та побудови нових мереж 4G та 5G необхідно розробляти методи, які дозволять підвищити ефективність

функціонування стільникових мереж зв'язку для того, щоб вони могли відповідати ряду критеріїв: забезпечують впровадження нових систем мобільного зв'язку і підтримку наявних (збереження вкладених інвестицій); відповідають вимогам архітектур мереж наступного покоління; мають ефективні засоби управління трафіком і забезпечення якості обслуговування; надають зручні засоби технічного обслуговування та експлуатації.

При цьому, із розвитком стільникових мереж з'являються нові більш досконалі мережеві архітектури для передачі даних та керування. Проте залишається ряд невіршених завдань та проблемних місць, які необхідно вирішувати та усувати відповідно.

Тому фактично виникає протиріччя між необхідними потребами щодо максимально ефективного функціонування стільникових мереж (обслуговування різних груп абонентів стільникових мереж із заданими показниками якості в умовах квазіреального часу, забезпечення ефективного використання технічного обладнання та каналів зв'язку та зменшення необхідних інвестицій), та фактичними можливостями існуючих інформаційно-комунікаційних технологій, методів та моделей щодо забезпечення цих високих вимог.

Таким чином, розроблення методології підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку є важливою науково-технічною проблемою, спрямованою на вдосконалення якості обслуговування абонентів сучасних стільникових мереж і забезпечення вимог до мереж такого типу.

Вищезгадана проблема, яка вирішувалась в даній дисертаційній роботі, обумовлює її **актуальність**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи та обраний напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний з реалізацією положень «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» (затверджена Кабінетом Міністрів України від 15 травня 2013 року), «Плану заходів на 2015-2017 роки щодо впровадження в Україні у 2017 році системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління»

(Рішення Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації № 434 від 18.08.2015), Основних пріоритетних напрямків «Національних проєктів»: «Відкритий світ» (створення інформаційно-комунікаційної (4G) освітньої мережі національного рівня) та «Місто майбутнього» (формування стратегічного плану системи та проєктів розвитку міста), з міжнародними програмами, зокрема, Horizon 2020 (ICT-08-2017 5G PPP Convergent Technologies, ICT-13-2016: Future Internet Experimentation - Building a European experimental Infrastructure, ICT-07-2017: 5G PPP Research and Validation of critical technologies and systems. Основні наукові результати отримано в рамках науково-дослідних робіт: «5G-XCast» (Horizon 2020, grant number 761498); шифр 874-ДБ13, тема «Створення та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках Концепції CNS/ATM ICAO» (НДР 0110U000225); шифр 161-ДБ17, тема «Квантово-криптографічні методи захисту критичної інформаційної інфраструктури держави» (НДР 0117U006770); шифр Платформа (НДР 0116U000072Т).

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає в аналізі існуючих методів безпроводової передачі інформації, моделюванні та дослідженні роботи розглянутих мереж зв'язку, розробці методів підвищення ефективності функціонування безпроводових мереж зв'язку.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування стільникових мереж.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких задач:

1. Проаналізувати якість обслуговування абонентів стільникових мереж з метою визначення ефективності їх функціонування, захищеності та визначити вимоги до стільникових мереж нового покоління.

2. Удосконалити метод планування радіомережі з урахуванням вимог до якості обслуговування та ефективності функціонування мережі, кліматичних умов, рельєфу місцевості та характеру забудови, на основі якого розробити

відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення для оцінки радіопокриття та попереднього розрахунку вартості розгортання мережі.

3. Розробити метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж з метою проведення безперервної оптимізації мережі стільникового зв'язку.

4. Розробити метод оптимізації підсистеми базових станцій (БС) стільникового оператора.

5. Удосконалити метод розвантаження радіоінтерфейсу стільникової мережі із використанням безпроводових мереж та керуванням цим процесом за допомогою програмно-конфігурованих мереж.

6. Розробити метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі.

7. Розробити метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти у стільниковій мережі нового покоління.

8. Удосконалити метод маршрутизації за рахунок резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки.

9. Розробити метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованого сегмента стільникового оператора під час впровадження нових сервісів.

10. Розробити методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку та відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення, що дозволить верифікувати запропоновані методи, моделі та методологію і підтвердити їх ефективність.

Об'єктом дослідження є процес передавання та обробки інформації в сучасних стільникових мережах зв'язку.

Предметом дослідження є методи оцінки та підвищення ефективності функціонування сучасних стільникових мереж зв'язку.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених цілей в дисертаційній роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів – для аналізу методів передавання інформації у широкосмугових радіосистемах стільникових мереж четвертого покоління; методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль – для дослідження процесу затухання електромагнітного поля; методи теорії телетрафіку – для генерування та дослідження розподілу навантаження на мережу; методи комп’ютерного моделювання – для перевірки адекватності розроблених моделей та алгоритмів; методи прямого синтезу – для розробки структурних схем пристроїв та систем; натурального експерименту – для перевірки адекватності розроблених методів підвищення ефективності функціонування стільникових мереж; математичної статистики – для обробки отриманих експериментальним шляхом та під час комп’ютерного моделювання статистичних даних, теорія множин – для опису множин кіберзагроз, мережевих функцій тощо.

Наукова новизна. У роботі отримані такі нові наукові результати.

1. Удосконалено метод планування мережі стільникового оператора за рахунок послідовного визначення стратегії розвитку оператора стільникового зв’язку, найбільш важливих показників якості обслуговування, виборі обладнання із множини доступних альтернатив, виборі послуг для абонентів, оцінці зон радіопокриття із врахуванням особливостей рельєфу та кліматичних умов, корегування розташування базових станцій, удосконаленій процедурі частотного планування, попередній оцінці капітальних витрат на побудову мережі, що дозволяє проводити більш точну оцінку зон радіопокриття, вибір ключових показників якості обслуговування, більш ефективне частотне планування та розрахунок капітальних витрат, що надає змогу операторам оцінити доцільність побудови варіанту мережі стільникового зв’язку.

2. Вперше розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж, який полягає у послідовному визначенні множини оцінюваних послуг, виборі на основі кореляційно-регресійного аналізу

статистичних даних якості обслуговування та рівня захищеності оптимальних критеріїв оцінювання функціонування мережі, безпосередній їх оцінці та порівнянні з допустимим рівнем, що на відміну від відомих, дозволяє проводити оцінку найбільш важливих показників ефективності функціонування та захищеності мережі стільникового оператора з метою їх постійного контролю та оптимізації під час впровадження нових сервісів під час обслуговування абонентів.

3. Вперше розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора, який полягає в послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми з урахуванням обмежень по якості обслуговування, допустимій смузі частот, кількості активних абонентів, використанні мультистандартних активних антенних систем та програмно-конфігурованого радіоінтерфейсу, що на відміну від відомих, дозволяє, при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж, проводити динамічний перерозподіл радіочастотних ресурсів мережі та оптимізувати витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій.

4. Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора з використанням підмережі стандарту не-3GPP шляхом використання нових алгоритмів вибору мережі для передачі даних, використання комбінацій протоколів MTCP, TCP, SCTP на різних ділянках мережі та в залежності від типу надаваних послуг, що дозволяє зменшити навантаження на радіоінтерфейс стільникової мережі, забезпечити балансування навантаження та підвищення ефективності функціонування радіопідмережі.

5. Вперше розроблено метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, який полягає у послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми станцій радіорелейного зв'язку з урахуванням технологічних обмежень до пропускної здатності каналів, оптимізації структури кожного шару із врахуванням технологічних обмежень

цього рівня, оснований на різноманітних параметрах функціонування мережі та показниках вартості, що на відміну від відомих, дозволяє здійснити удосконалення структури транспортної мережі при переході до мереж нових поколінь, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та підвищення економічної ефективності транспортної мережі.

6. Удосконалено метод маршрутизації з резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки за рахунок послідовного визначення характеристик мережі (пропускну здатність, затримка, завантаженість каналу), визначення необхідного резерву в каналі зв'язку, визначення альтернативних шляхів передавання даних з урахуванням ризиків інформаційної безпеки, розробки порогових значень для різних типів сервісів та виконання перерозподілу потоків, що дозволяє, надаючи підвищений рівень надійності та захищеності мережі, підвищити ефективність функціонування транспортних каналів.

7. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі, що використовується для керування мережею стільникового оператора та впровадження нових сервісів, що полягає у послідовному виборі оптимальної архітектури сегменту програмно-конфігурованої мережі, оцінці основних показників ефективності її функціонування, що на відміну від відомих, дозволяє проводити більш гнучке та оперативне розширення мережі, впровадження нових сервісів та підвищення оперативності доставки даних.

8. Вперше розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, який полягає в удосконаленні архітектури стільникових мереж зв'язку шляхом введення додаткових безпекових функцій та послідовному зборі інформації про виникнення кіберінцидентів в стільниковій мережі, виявленні типів кібератак, об'єктів та ступеня впливу, реагування на кібератаки та збереження інформації про кіберінциденти в спеціалізовану базу даних, що дозволяє в режимі

реального часу проводити моніторинг стану забезпечення кібербезпеки, підвищувати її рівень та ефективність функціонування стільникової мережі.

9. Вперше розроблено методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi (Wireless Fidelity), методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мереж, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, що на відміну від відомих, надає можливість за рахунок безперервного моніторингу ключових показників якості функціонування мережі оперативно підвищувати ефективність функціонування стільникової мережі та якість обслуговування абонентів.

Вищенаведені **наукові результати** дають можливість вирішити проблему підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів. Теоретичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, відкривають можливість виявити і запропонувати нові практичні шляхи підвищення ефективності функціонування стільникових мереж під час їх впровадження в Україні на основі використання нових методів керування мережею, передавання даних, безперервної оптимізації мережі, моніторингу та реагування на кіберінциденти.

При цьому отримані результати дозволяють:

- підвищувати ефективність планування розміщення базових станцій із використанням уточнюючих факторів;
- оцінювати рівень завантаженості радіоінтерфейсу та транспортної мережі стільникового оператора з метою підвищення ефективності їх функціонування;
- вибирати оптимальні показники ефективності функціонування мережі стільникового оператора;
- проводити оптимізацію параметрів мережі стільникового оператора;
- проводити більш ефективне керування мережею стільникового оператора;
- запроваджувати нові сервіси для використання в стільниковій мережі;
- проводити розвантаження радіоінтерфейсу стільникової мережі;
- забезпечувати резервування ресурсів транспортної мережі;
- проводити попередню оцінку вартості проектного рішення мережі LTE.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в такому:

- розроблено методику безперервної оптимізації ефективності функціонування мережі стільникового оператора;
- розроблено методику планування радіопокриття мережі стільникового оператора;
- розроблено методику вибору сучасних технічних рішень, а також специфікації у галузі уніфікованих комунікацій, побудованих за технологією IMS/A-IMS для побудови загальнодержавної мережі;
- розроблені удосконалені алгоритми розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж із використанням технологій Wi-Fi, Li-Fi (Light Fidelity) та концепції SDN;
- розроблено відповідне алгоритмічне і програмне забезпечення для оцінки вартості мережі стільникового зв'язку;
- розроблено програмне забезпечення для оцінки показників KPI та KQI мережі стільникового оператора;
- розроблено навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіопокриття базових станцій мережі LTE;

- розроблено програмне забезпечення для оцінки показників якості обслуговування кінцевих вузлів в концепції IoE (Internet of Everything);
- розроблено структуру багатоканального шлюзу для мереж 5G;
- розроблено імітаційну модель мережі SDN.

Матеріали дисертаційної роботи упроваджено у діяльність ТОВ «М.М.Д Смарт Україна», ТОВ «Українські новітні технології» (ТМ «Freshtel»), Bundleslab KFT (Угорщина), Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації, навчальний процес Університету в Бельсько-Бялій, Національного авіаційного університету, Державного закладу «Київський коледж зв'язку» та Центру перепідготовки та підвищення кваліфікації Київської обласної державної адміністрації.

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок автора. Основні положення й результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить: розробка методу адаптивного регулювання потужності передавачів в стільникових мережах в залежності від кліматичних умов [1]; аналіз результатів моделювання самоподібного трафіку в телекомунікаційних мережах [2]; розробка структури шлюзу для інтеграції різних безпроводових технологій [3]; розробка архітектури ядра мережі 5G для забезпечення багатоканальної передачі даних [4]; розробка нового методу маршрутизації в безпроводових мережах в залежності від стану каналу [5]; моделювання сигналів OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) в сучасних стільникових мережах [6]; статистична оцінка результатів моделювання QAM (Quadrature Amplitude Modulation) сигналів в сучасних широкосмугових радіосистемах [7]; розробка методу розвантаження радіоінтерфейсу в сучасних стільникових мережах 4G та 5G [8]; розробка математичної моделі для оцінки величини втрат потужності під час впливу кліматичних чинників [9]; розробка методу оптимізації

підсистеми базових станцій стільникового оператора [10]; розробка методу оптимізації потоків трафіку в транспортній мережі стільникового оператора [11]; розробка методу оцінки масштабованості програмно-конфігурованих мереж із різною архітектурою управління [12]; розробка структури шлюзу для інтеграції безпроводових сенсорних мереж та мереж LTE [13]; оцінка параметрів, які впливають на надійність мереж SDN [14]; оцінка додаткових параметрів, отриманих в радіоканалі [15, 16]; вибір основних ключових показників для оцінки захищеності стільникових мереж [17]; моделювання DoS (Denial of Service) атак на сервер [18]; розробка методу удосконалення архітектури систем безпеки стільникових мереж 5G [20]; розробка методу оцінки ключових показників захищеності в стільникових мережах [26]; формування вимог до стільникових мереж нового покоління в Україні [27]; дослідження основних недоліків сучасних базових станцій [28]; розробка архітектури програмного забезпечення та вибір параметрів для вимірювання стільникових мережах для їх подальшої статистичної обробки [29]; розробка методики вибору оптимального проектного рішення для побудови мережі LTE [30]; формування обмежень, які накладаються на кожний наступний рівень багаторівневого транспортного сегменту мереж LTE [31]; розробка математичного апарату, який використовується для резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі стільникових операторів [32]; аналіз архітектури та недоліків сучасних систем моніторингу стільникових мереж зв'язку [33]; розробка архітектури системи управління кіберінцидентами в мережах LTE [34]; визначення вимог до систем безпеки сучасних стільникових мереж [35]; аналіз методу розвантаження мережі LTE із використанням концепції Hotspot 2.0 [36]; удосконалений метод розвантаження мережі LTE із використанням концепції програмно-конфігурованих мереж [37]; моделювання роботи overlay мереж SDN [38]; розробка математичної моделі та алгоритму для оцінки пропускнуої здатності систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) сучасних стільникових мереж [39]; аналіз безпроводових мереж передавання даних та сучасних технологічних рішень, які можуть бути

використані в концепції BYOD (Bring Your Own Device) [40]; розробка методики та обробка результатів експериментальних досліджень пропускну здатності безпроводових мереж зв'язку [41]; розробка моделі інтеграції різноманітних сервісів в мережу стільникового оператора [42]; розробка безпроводового сегменту мережі аеропорту [43]; розробка моделі оцінки радіусу зон покриття безпроводових мереж в складних умовах розповсюдження радіохвиль [44]; моделювання величини втрат потужності радіосигналу для різних моделей розповсюдження радіохвиль [45]; дослідження відмінностей в архітектурах стільникових мереж різних поколінь [46]; розробка способу інтеграції мереж Li-Fi та Wi-Fi [47]; аналіз архітектури Інтернету речей [48, 49]; удосконалення методу проектування мережі SDN [50].

Апробація дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях і семінарах: Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми розвитку науки і техніки» (Київ, ДУТ, 2015 р.); International scientific-practical conference «Information and telecommunication technologies: education, science and practice» (Казахстан, Алмати, 2015 р.); Міжнародний круглий стіл «Про національну і інформаційну безпеку РК» (Казахстан, Алмати, 2016 р.); IEEE International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)» (Київ, НАУ, 2015 р., 2017 р.); IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)» (Харків, ХНУРЕ, 2015 – 2018 рр.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи і мережні технології» (Київ, НАУ, 2015 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «ITSEC» (Київ, НАУ, 2014 – 2018 рр.); Всеукраїнська науково-практична конференція «Стан та удосконалення безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем «SITS» (Коблево, 2015 – 2018 рр.); Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2015» (Київ, НАУ, 2015 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології» (Кропивницький, КНТУ, 2016 р.); XI mezinárodní vědecko - praktická konference

«Aktuální vymoženosti vědy – 2015» (Praha, 2015); Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2014 р., 2016 р., 2018 р.); International Conference on Electronics and Information Technology, EIT 2016 (Одеса, 2016 р.); 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Київ, НАУ, 2016, 2018 р.); XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні засоби зв'язку» (Мінськ, 2016, 2018 р.); Науково-технічна конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем» (Київ, НАУ, 2014 – 2018 рр.); Inter-University Conference «Engineer of 21st Century» (Belsko Biala, 2016 – 2018 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 95 наукових праць, у тому числі: 3 патенти на корисні моделі, 5 розділів колективних монографій, 26 статей у фахових виданнях, які входять в перелік наукових видань, затверджений МОН України, 3 статті у періодичних виданнях, які включені до науково-метричної бази Scopus, інших 15 праць, які включені до науково-меторичної бази Scopus, матеріали доповідей на науково-технічних конференціях – 43.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел (вкінці кожного розділу основної частини дисертації) та додатків і має 286 сторінок основного тексту, 157 рисунків, 18 таблиць, 37 сторінок додатків. Список використаних джерел містить 273 найменування і займає 34 сторінки. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 385 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ЗАХИЩЕНОСТІ СУЧАСНИХ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ

Для підтримування високошвидкісних додатків, користування новими послугами, підтримки постійного мобільного доступу до мережі Інтернет телекомунікаційним операторам необхідно розробляти плани щодо впровадження новітніх технологій та оновлення вже існуючих підприємств зв'язку з урахуванням загальних тенденцій науково-технічного й інноваційного розвитку.

Крім того, стан розвитку зв'язку у великій мірі визначає економічний рівень будь-якої держави. Особливо актуальною проблемою є розвиток телекомунікацій для нашої країни. Існуючі мережі зв'язку вже не можуть задовольнити потреби ринку за якістю та ефективністю обміну інформацією. З іншого боку, розвиток мобільного зв'язку передбачає величезні інвестиції в економіку країни, підвищення рівня інтеграції зі світовим співробітництвом, розвиток малого і середнього бізнесу, розвиток інфраструктури зв'язку загального користування України.

Ці ж самі тенденції стосуються стільникових мереж. Тому в даному розділі було проведено дослідження ефективності функціонування стільникових мереж як в Україні зокрема, так і в світі.

Зокрема, спочатку було проведено змістовний аналіз сучасних стільникових мереж, які діють по всьому світу, з метою визначення їхніх недоліків та потенційних шляхів їх покращення. Були досліджені мережі 4G, їх архітектура та якість обслуговування на сьогоднішній день. За результатами досліджень було встановлено не досить задовільну якість обслуговування абонентів та відповідно ефективність функціонування стільникових мереж. Тому було проаналізовано, які проблеми є причиною цього.

Після цього було проаналізовано вимоги до стільникових мереж нового покоління та технологічні рішення, які можуть допомогти їх досягти. Було встановлено ряд їх недоліків та були встановлені шляхи їх усунення.

1.1. Аналіз типових архітектурних рішень для побудови мереж стільникового зв'язку

1.1.1. Розвиток стільникових мереж в Україні

16 червня 1993 року вважається датою, коли в Україні було запроваджено стільниковий зв'язок і здійснено перший дзвінок з мобільного телефону. Першою компанією на ринку стільникового зв'язку стала компанія «Український Мобільний Зв'язок» (UMC) [1].

Основними ж віхами в історії розвитку стільникових мереж в Україні слід вважати наступні дати:

1997 рік – створення першої в Україні мережі стандарту GSM-900 [2], що передбачала надання більш ширших можливостей, використання телефону у роумінгу (мережу створила компанія UMC);

2000 рік став переломним. Лідируючі позиції надовго перехопив Kyivstar.

2002 рік – UMC підключає мільйонного абонента. До цього часу «Київстар» тестово запроваджує технологію передачі даних GPRS (General Packet Radio System) [3].

2004 рік - впровадження високошвидкісної передачі даних EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) [4].

2005 рік – липень Київстар реєструє 10 млн. абонентів, серпень про теж саме заявляє UMC. На ринок дуже швидко входить турецька компанія «Астеліт» зі своїм брендом Life:).

В цих умовах постійна боротьба призводить до того, що на ринку з'являються все нові більш вигідні пропозиції і акційні стартові пакети. Кожна із компаній починає анонсувати запуск мереж наступних поколінь. Кожен із найбільших стільникових операторів вже давно мали тестові закриті 3G мережі, проте із ряду причин не могли запуснути їх у комерційне використання.

Стільниковий оператор МТС ще в 2010 році анонсував запуск тестової мережі LTE [5]. Проте до зовсім недавнього часу не відбувалося якісного переходу (стрибку) в стільникових мережах в Україні.

Якщо відкрити карту покриття мобільного Інтернету в світі на сайті Opensignal.com [6] або mobua.net [7] і виставити мітки навпроти значків 4G, то Україна здається білою плямою в Європі – тут є переважно лише зв'язок повільного за сучасними мірками, застарілого стандарту 3G та далеко не вся країна накрита 4G.

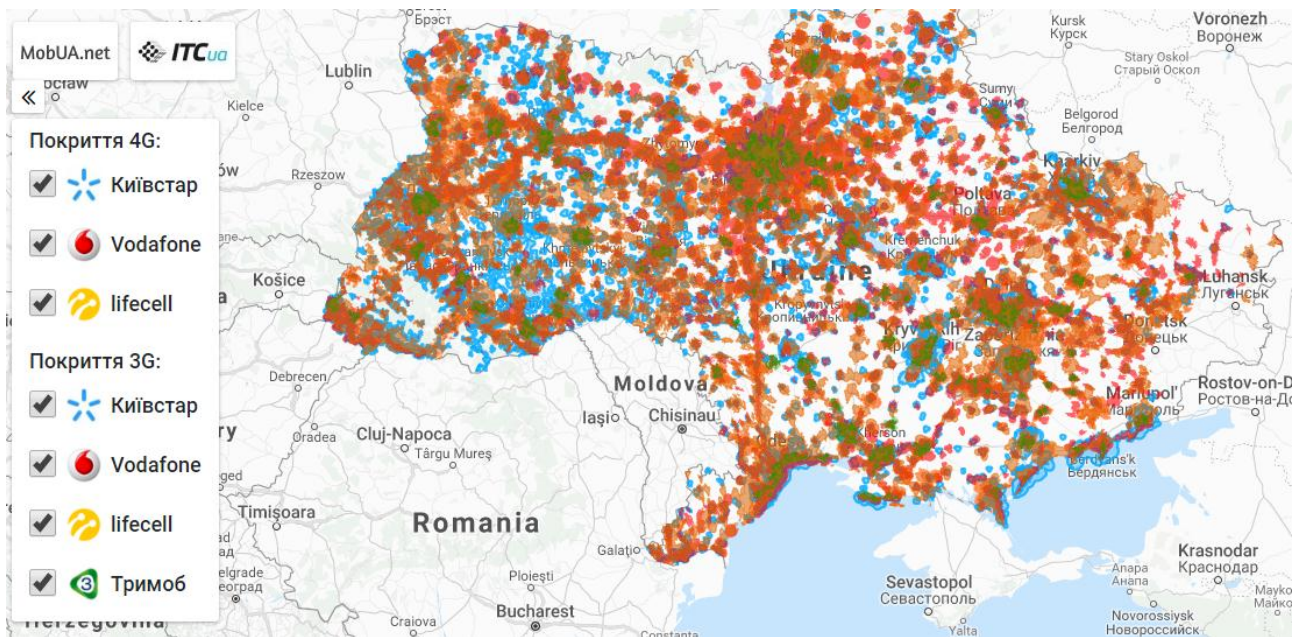


Рис. 1.1. Покриття стандартів покоління 3G та 4G в Україні

Але від 23 лютого 2015 року, коли нарешті Нацкомісія з регулювання зв'язку продала на конкурсі 3G-ліцензії всім трьом найбільшим стільниковим операторам країни – Астеліту (торгова марка Life :)), МТС-Україна і Київстару, ситуація кардинально змінилася на краще. Сумарна вартість ліцензій для операторів склала 8,6 млрд грн [6].

Наступним логічним кроком розвитку стільникових мереж в Україні був запуск перших мереж LTE.

Так, 30 березня 2018 року в Україні офіційно почав працювати мобільний інтернет четвертого покоління, як його ще називають, 4G, або LTE –

представники "великої трійки" українських операторів (Vodafone, Київстар і Lifecell) запустили послуги нового покоління [9].

Слід відзначити, що на даний момент покриття не є безперервним, і зв'язок не завжди є стабільним навіть у великих містах. Поки що найвища швидкість зафіксована користувачами в центрі Львова – 83 Мбіт/с! У столичному районі Троєщина заявляють про швидкість 32 Мбіт/с, на одеській Молдаванці – 22 Мбіт/с, приблизно стільки ж на пл. Свободи в Харкові [10].

Наразі всі оператори працюють в частоті 2600 МГц, яка може забезпечити тільки часткове покриття у великих містах. Сучасна частота з повноцінним покриттям (1800 МГц) запрацювала з липня 2018 року. Як зазначають оператори і експерти, це дозволяє повністю охопити навіть ті міста, в яких проживає менше 10 тисяч осіб.

Проте під час розгортання мереж нового типу в Україні всеодно виникає ряд технологічних, юридичних та інших проблем, які необхідно терміново вирішувати. Тому дане дисертаційне дослідження присвячене саме підвищенню ефективності вже наявних стільникових мереж та впровадження нових як в Україні передусім так і за її межами.

Надалі в першу чергу проведемо аналіз сучасних стільникових мереж, які функціонують по всьому світу з метою визначення їх недоліків та окреслення перспективних напрямів підвищення ефективності їх функціонування.

1.2. Аналіз архітектури та основних характеристик стільникових мереж LTE

Найбільш поширеними стільниковими мережами, в тому числі розгорнутими в Україні поки що являються мережі UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [11].

Проте із ростом користувацького трафіку, кількості застосунків тощо виникла необхідність забезпечувати передачу даних із швидкостями, які значно більші за заявлені у стандарті 3G, тому у 2010 році було стандартизовано 2 технології 4-го покоління. До них були віднесені мережі LTE Rel. 10 та Wi-

MAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) Rel. 2 [12]. Як вже стало зовсім очевидним перші мережі розгорнуті вже в більшості розвинених країн, натомість для другої залишилась тільки незначна ніша для використання – надання високоякісного зв'язку стаціонарним та номадичним абонентам. Тому предметом розгляду даного дисертаційного дослідження було обрано саме технологію LTE, а також її еволюцію на шляху до 5G.

1.2.1. Основні характеристики мереж LTE

Мережі 4G на основі стандарту LTE працюють у всіх існуючих діапазонах частот, що виділені для стільникового зв'язку по усьому світу. У Північній Америці: 700, 750, 800, 850, 1900, 1700/2100, 2500 та 2600 МГц, відповідно діапазони 4, 7, 12, 13, 17, 25, 26, 41 МГц; 2500 МГц – у Південній Америці; 800, 900, 1800, 2600 МГц – у Європі, відповідно діапазони 3, 7, 20 МГц; 1800 та 2600 МГц – у Азії, відповідно діапазони 1, 3, 5, 7, 8, 11, 13, 40 МГц; 1800 МГц та 2300 МГц у Австралії та Новій Зеландії відповідно діапазони 3МГц та 40МГц [13].

Швидкість скачування за стандартом 3GPP LTE в теорії досягає 326,4 Мбіт/с (download), і 172,8 Мбіт/с на віддачу (upload) [14]. Практично забезпечує швидкість передачі даних від базової станції до пристрою абонента до 100 Мбіт/с і швидкість від абонента до базової станції — до 50 Мбіт/с.

Мережа LTE складається з двох найважливіших компонентів: мережі радіодоступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) і базової мережі SAE (System Architecture Evolution) або EPC (Evolved Packet Core Network) (рис. 1.2) [13].

Основним досягненням такої архітектури, в порівнянні з попередніми поколіннями є менші затримки при передачі як даних користувача, так і керуючої інформації у зв'язку з проходженням через менше число проміжних елементів [15].

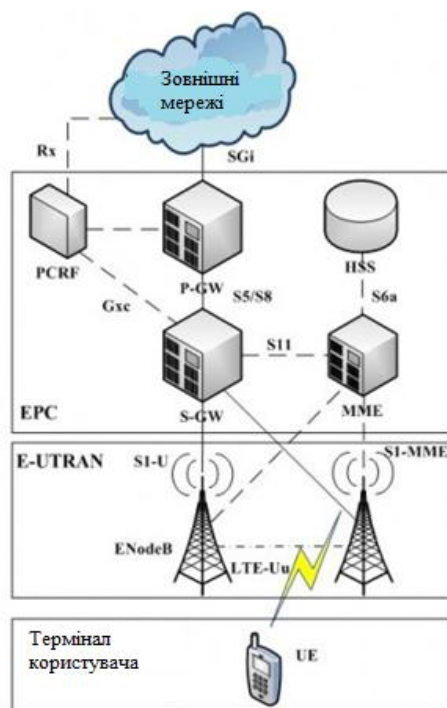


Рис.1.2. Спрощена архітектура мережі LTE

Обмін даними в мережі EPC відбувається тільки по IP (Internet Protocol) протоколу з комутацією пакетів, що суттєво відрізняє мережу LTE від мереж попередніх поколінь, в яких використовувалася комутація каналів між окремими елементами. В дану мережу входять елементи, що відповідають за управління, маршрутизацію, комутацію і зберігання різних даних, про які далі буде розказано більш докладно [13, 17].

Мережа E-UTRAN, що складається з базових станцій (eNodeB) бере на себе функції радіоінтерфейсу і є сполучною ланкою між терміналами (UE (User Equipment)) і мережею EPC. Основною особливістю, що відрізняє мережу LTE від мереж інших поколінь, є те, що базові станції eNodeB можуть обмінюватися між собою інформацією по протоколу X2 і здійснювати функції управління. На відміну від стандарту GSM, де підсистема базових станцій BSS (Base Station Subsystem) складалася з базового приймача BTS (Base Transceiver Station) і контролера базових станцій BSC в мережі LTE в одному елементі eNodeB об'єднані функції передавача і контролера. Основні технічні характеристики стандарту LTE зведені до таблиці 1.1 [13].

Основні технічні характеристики стандарту LTE

Характеристика		Значення
Смуга частот, МГц		1; 4; 3; 5; 10; 15; 20
Метод багатостанційного доступу	Низхідний канал	OFDM
	Висхідний канал	SC-FDMA
Символьна швидкість, символів/с		14000
Завадостійке кодування		загортальні коди, турбокоди
Тривалість радіокадра, мс		10
Мінімальний інтервал між кадрами, мс		1
Стандартний крок між піднесними, кГц (канал “вниз”)		15
Інформаційна одиниця в каналі		ресурсний блок
Кількість піднесних на ресурсний блок (займаюча ресурсним блоком смуга)		12(180 кГц)
Циклічний префікс, мкс	Стандартний	4,7 (5,2 –перед першим символом)
	Розширений	16,7
Дуплексний режим		Частотний (FDD)
		Часовий (TDD)
Модуляція сигналу		QPSK, 16QAM, 64QAM
Максимальна ефективна випромінююча, потужність, дБм	UE	23
	eNodeB	46

1.2.2. Дослідження мережі LTE-Advanced

Процес визначення майбутнього сімейства стандартів IMT-Advanced почався зі звернення ITU-R, який вимагав представити можливий Radio Interface Technologies (RITs) і налаштування Radio Interface Technologies (SRITs) для IMT-Advanced [17, 18]. Проте, всі специфікації, наявні на момент,

для IMT-Advanced не мали нових технічних деталей, які відповідали б властивостями майбутніх 4G систем. Замість цього, вони посилалися на Рекомендацію M.1645 [19], в якій були нечітко визначені цілі розвитку сімейства стандарту IMT-Advanced: дійти до 100 Мбіт/с для мобільного доступу і до 1 Гбіт/с для стаціонарного радіо доступу (табл.1.2). На жаль, це не було реалізовано до листопада 2008 року, коли були описані вимоги до технічних характеристик для IMT-Advanced інтерфейсу [18].

Таблиця 1.2

Вимоги до IMT-Advanced в порівнянні з вимогами до LTE-Advanced

Характеристика	Вимоги ITU-R M.2134 [18]		Вимоги LTE-A TR 36.913 [20]
Максимальна швидкість передачі даних(Гбіт/с)	1		1-(DL) 0.5-(UL)
Відгук	С-план<100мс U-план<10мс		С-план<50мс U-план<5 мс
Максимум спектральної ефективності (біт/с/Гц)	DL UL	15(4x4) 6.75(2x4)	30(8x8) 15(4x4)
Спектральна ефективність стільника (біт/с/Гц/на соту)	DL UL	2.2(4x2) 1.4(2x4)	2.4(2x2) 2.6(4x2) 3.7(4x4) 1.2(1x2) 2.0(2x4)
Границі спектральної користувальницької ефективності в соті (біт/с/Гц/на соту/на користувача)	DL UL	0.06(4x2) 0.03(2x4)/	0.07(2x2) 0.09 (4x2) 0.12(4x4) 0.04(1x2) 0.07 (2x)
Мобільність	більше 350 км/год		більше 350 км/год
Смуга пропускання	більше 40 МГц		більше 100 МГц

Вимоги до LTE-Advanced [18-20]:

1. *Пікова швидкість передачі даних.* Пікова швидкість передачі даних - це максимальна швидкість передачі даних, яка повинна підтримуватись з точки

зору системних вимог (а не з точки зору вимог до продуктивності радіоканалу), незалежно від параметрів радіоінтерфейсу таких, як ширина каналу і конфігурація антен [21]. Цільові значення для системи: 1 Гбіт/с в низхідному каналі і 500 Мбіт/с у висхідному каналі.

2. *Затримка.* Загальна затримка передачі сигнального трафіку повинна бути істотно зменшена в порівнянні з EPC-Rel 8 (LTE) [22]. Загальна затримка передачі сигнального трафіку включає в себе час передачі на ділянці радіоінтерфейсу (RAN) і опорної мережі (CN (Core Network)) в умовах малого навантаження (виключаючи час передачі на S1 інтерфейсі, тобто ділянці між eNB (Evolved Node B) і MME (Mobility Management Entity)). Цільовий час, необхідний на перемикання мобільної станції з холостого стану (Idle) в активний, має становити менше 50 мс. А час перемикання зі стану очікування (dormant state) в активний стан має бути менший 10 мс (виключаючи затримку, пов'язану з процедурою періодичної передачі/прийому, DRX (Discontinuous Reception)) [18].

Система повинна бути здатна підтримати до 300 активних користувачів без використання DRX режиму (аналог режиму Sleep Mode в IEEE 802.16) при ширині каналу в 5 МГц. З використанням режиму DRX система повинна підтримувати таку ж кількість RRC (Radio Resource Channel) з'єднань, як і в Rel.8, а саме 16000 [22].

При передачі даних, призначених для користувача, повинні досягатися менші затримки в порівнянні з Rel.8, особливо в ситуаціях, коли мобільній станції ще не виділено ресурс для передачі даних і коли мобільній станції потрібно синхронізуватися і отримати ресурс для передачі.

3. *Пікова спектральна ефективність.* Пікова спектральна ефективність – це максимальна швидкість передачі даних (передбачається передача даних без помилок), нормована на ширину каналу всього сектора, коли весь наявний ресурс виділяється одній мобільній станції [23]. Цільові значення для пікової спектральної ефективності при низхідній передачі 30 біт/с/Гц, а при висхідній передачі 14 біт/с/Гц [13].

4. *Середня спектральна ефективність.* Середня спектральна ефективність визначається як загальна пропускна здатність всіх користувачів (тобто кількість успішно переданих біт за певний проміжок часу), нормована на загальну ширину каналу сектора і поділена на кількість секторів [23]. Середня спектральна ефективність вимірюється в біт/с/Гц/сектор.

Система повинна забезпечувати якомога більш високе значення середньої спектральної ефективності при розумній складності самої системи. Для прикладу наведемо максимальні цільові значення для середньої спектральної ефективності. Для низхідного каналу це значення дорівнює 3.7 біт/с/Гц/сектор (при конфігурації 4x4, тобто 4 передавальні і 4 прийомні антени), а для висхідного каналу - 2.0 біт/с/Гц /сектор (при конфігурації 2x4).

5. *Спектральна ефективність на кордоні сектора.* Спектральна ефективність для мобільної станції, що знаходиться на кордоні сектора, визначається як значення інтегральної функції розподілу, нормованої до пропускної спроможності, в точці 5 %. Система повинна забезпечувати максимально можливе значення спектральної ефективності для користувачів, що знаходяться на кордоні сектора , при дотриманні розумної складності самої системи. Для прикладу наведемо максимальні цільові значення для спектральної ефективності, характерної для кордону сектора. Для низхідного каналу це значення дорівнює 0.12 біт/с/Гц/сектор/користувач (при конфігурації 4x4), а для висхідного каналу - 0.07 біт/с/Гц/сектор/користувач (при конфігурації 2x4). Значення наведені для випадку, коли в одному секторі знаходиться 10 користувачів.

6. *Кількість VoIP (Voice over IP) дзвінків.* Кількість одночасно підтримуваних VoIP дзвінків повинна бути збільшеною в порівнянні зі значеннями, зазначеними в [25], для всіх можливих конфігурацій.

7. *Мобільність.* Система повинна підтримувати роботу з мобільними користувачами, які можуть рухатися зі швидкістю до 350 км/год (або навіть до 500 км/рік, залежно від використовуваних частот). Продуктивність системи повинна бути поліпшена при роботі з користувачами, які переміщуються зі

швидкостями від 0 до 10 км/год. Для більш мобільних користувачів (переміщаються з більш високими швидкостями) продуктивність системи як мінімум не повинна бути гірше, ніж в Rel.8.

8. *Частотні діапазони.* До наявних частотних діапазонів також додаються наступні: 450-470 МГц; 698-862 МГц; 790-862 МГц; 2.3-2.4 ГГц; 3.4-4.2 ГГц; 4.4-4.99 ГГц. Нова система (LTE-A) повинна підтримувати роботу з різними розмірами частотних діапазонів, в тому числі і з більш широкими діапазонами (наприклад до 100 МГц), ніж зазначені в Rel.8, для того, щоб забезпечити більш високу продуктивність і цільову пікову спектральную ефективність. Також повинна бути можливість як роботи в режимі частотного (FDD), так і в режимі часового (TDD) дуплексу.

В таблиці 1.3 нижче приводиться порівняння вимог IMT-Advanced, LTE Rel.8 і LTE-Advanced.

Таблиця 1.3

Порівняння вимог до IMT-Advanced, LTE Rel.8 і LTE-Advanced

Параметр	Вимоги IMT-A	LTE Rel.8	LTE-A (Rel.10)
Ширина каналу	мінімум 40 МГц	до 20 МГц	до 100 МГц
Пікова спектральна ефективність:			
-низхідний канал	15 біт/с/Гц	16 біт/с/Гц	16 (30)* біт/с/Гц
-висхідний канал	6,75 біт/с/Гц	4 біт/с/Гц	8,1(16,1)** біт/с/Гц
Затримка:			
-сигнальні дані	<100мс	50мс	50мс
-дані користувача	<10мс	4,9мс	4,9мс

* - значення приведені для конфігурації 4x4 (в дужках 8x8)

** - значення приведені для конфігурації 2x2 (в дужках 4x4)

Таким чином, в даному підрозділі був проведений аналіз мереж LTE та LTE-Advanced. Спочатку було розглянуто мережу LTE, її архітектуру, основні елементи мережі та технічні характеристики. Далі було розглянуто мережу

LTE-Advanced, а також визначено технічні характеристики та основні вимоги до мережі LTE-Advanced. На відміну від LTE, мережі LTE-Advanced підтримує більш широку смугу пропускання до 100 МГц.

Також різниця в тому, що архітектура мережі LTE-Advanced, порівняно з мережею LTE, набагато простіша та удосконалена, завдяки новим елементам мережі. Виходячи з цього, можна сказати, що технологія LTE-Advanced є значно простішою, але технічні характеристики є значно кращими, у порівнянні з третім поколінням.

1.3. Аналіз показників ефективності функціонування стільникових мереж

1.3.1. Оцінка ефективності функціонування стільникових мереж в Україні

Як уже було зазначено у вступі до даної роботи, для оцінки ефективності функціонування $W = \{W_C, W_T, W_E\}$ необхідно по суті оцінити цільову ефективність W_C , технічну ефективність W_T та економічну ефективність W_E .

Спершу проведемо оцінку показників, які характеризують стільникову мережу з точки зору відповідності її цільовому призначенню. Для цього введемо множину параметрів $W_C = \{R, t_{затр}, IS\}$, де R – фактична швидкість передавання даних, $t_{затр}$ – час затримки при передачі даних, IS – комплексний параметр, який характеризує забезпечення інформаційної безпеки в мережі.

Таким чином, почнемо аналіз ефективності функціонування із аналізу параметрів якості обслуговування. Ще в 2015 році довгоочікуваний зв'язок третього покоління нарешті повномасштабно прийшов в Україну та діє майже на всій її території. Тому надалі наведено результати тестування 3G мереж найбільших стільникових операторів в Україні.

Оператор lifecell першим запустив зв'язок 3G в Києві і Львові – 4 червня і 19 травня 2015 року відповідно [25, 26]. В результаті в кінці червня загальне споживання мобільного інтернету 3G + досягло 147 Тбайт в Києві і 17 Тбайт у

Львові, що означає зростання на 60% і 47% відповідно [27]. Як відзначає оператор, приблизно 40% 3G-трафіку припадає на такі сервіси, як Youtube, Play Market, Cloud та інші. В середньому абоненти lifecell переглядають близько 7,5 тисяч годин Youtube відео в день [27].

Оцінка пропускної здатності 3G-інтернету від lifecell показала найбільш цікаві результати (рис. 1.3, рис. 1.4) [27]. У певні моменти швидкість завантаження даних досягала 17-23 Мбіт/с, а швидкість віддачі – 4,36 Мбіт/с. Відзначимо, що таких пікових показників не зміг продемонструвати жоден з інших операторів. Середня швидкість завантаження становила 5-7 Мбіт/с.



Рис. 1.3. Результати тестування швидкості передавання даних для різних операторів 3G в Україні



Рис. 1.4. Результати тестування швидкості передавання даних для найбільших операторів стільникового зв'язку за даними Global Net Index

По швидкодії поки що лідерські позиції утримував lifecell, «Київстар» трохи відставав.

Структура трафіку в мережах операторів продовжить змінюватися в бік збільшення споживання даних, переважно відео і месенджерів.

В розвинених країнах і країнах споживання даних зростає стрімкими темпами. У мережі Vodafone (оператор другий за кількістю абонентів в світі) споживання мобільного трафіку зросло на 80%. У 2015 році в мережі оператора було передано 982 петабайта даних, в 2014 для порівняння – 544 петабайта. Кількість SMS повідомлень впала з 337 млрд до 290 [27]. При цьому слід відзначити, що кількість хвилин розмов залишилась на колишньому рівні.

В Україні є своя специфіка у кожного оператора. У «Київстар», наприклад, за рік споживання трафіку зросло на 83%, а голосового зв'язку на 5% (до 559 хвилин на абонента в місяць). Оператор lifecell, у якого мобільний доступ до мережі Інтернет традиційно був більш популярною послугою, наростив споживання трафіку. За даними компанії, за 8 місяців 2016 цей показник зріс на 133% в порівнянні з аналогічним періодом 2015 року. За 3 місяці, за даними оператора, його абоненти використовували близько 117 ТБ в день, це на 152% більше показника 2015 року.

Абоненти Vodafone за рік стали використовувати в три рази більше мобільного Інтернету при зростанні бази інтернет-користувачів на 26%. В середньому на активного користувача припадає 1 ГБ в місяць.

Треба розуміти, що порівняння в процентному співвідношенні не є зовсім коректним, оскільки, щоб порівнювати результат, потрібно знати додаткові умови. У «Київстар», в порівнянні з lifecell, мобільний інтернет в 2015 році не був сильною стороною, дані Vodafone за той період є і зовсім невідомі. Але зараз всі показники зростають, і очевидно, що більше зростає об'єм трафіку у тих операторів, у яких вищий рівень проникнення смартфонів в мережі. При цьому, слід враховувати, що тільки у lifecell з усієї трійки сьогодні більше 50% «розумних» мобільних пристроїв. За lifecell йде Vodafone, потім «Київстар». У обох операторів кількість смартфонів в мережі недавно переступила за третину.

Зміни передбачувано торкнулися і структури трафіку (рис. 1.5).

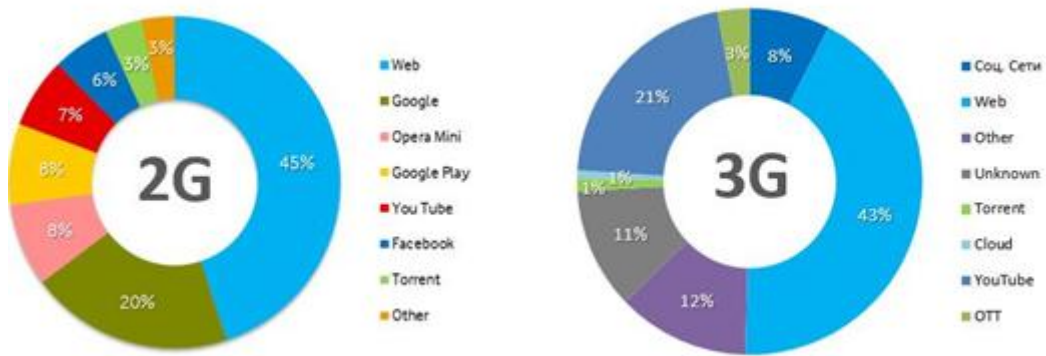


Рис. 1.5. Структура споживання трафіку в мережах стільникового зв'язку в Україні

Більше запитів припадає на відео і спілкування в месенджерах, менше – на веб-серфінг. Що й зрозуміло, так як при швидкості 2G єдине, для чого підходив мобільний інтернет – це пошук інформації і геолокаційних даних. З 3G абоненти почали переключатися на відео і дзвінки через інтернет, хоча веб-серфінг як і раніше залишається актуальним.

Структура споживання трафіку в мережі Vodafone виглядає наступним чином (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Структура споживання трафіку в мережі Vodafone

На рис. 1.7 приведено структуру споживання трафіку соціальних мереж в мережі оператора lifecell.

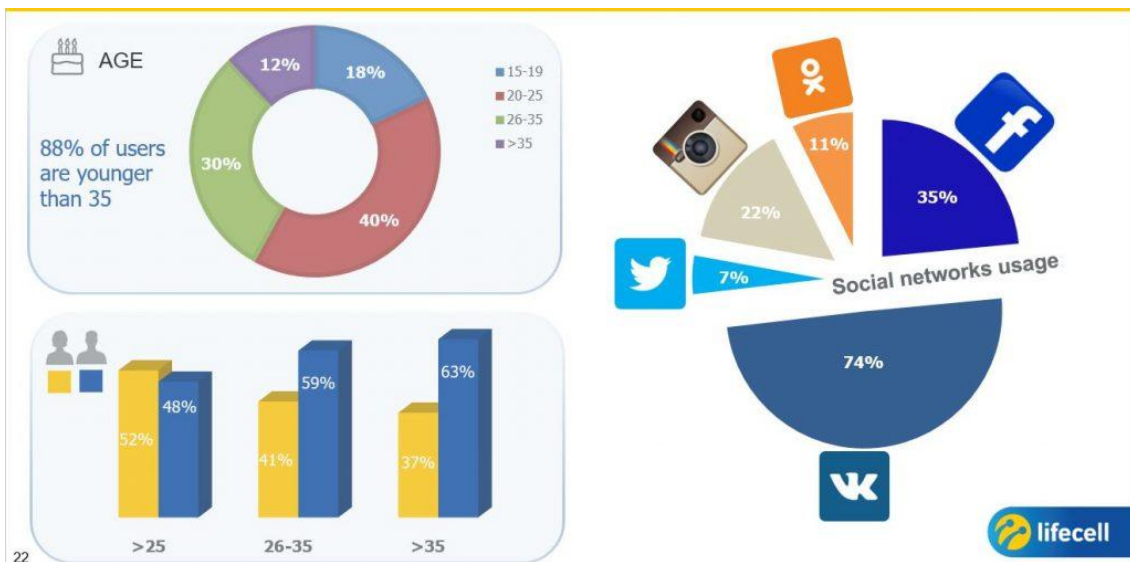


Рис. 1.7. Структура споживання трафіку соціальних мережах в мережі lifecell (червень 2016)

Що ж стосується тестів вже запущених 4G мереж, то можна стверджувати, що поки що покриття як за даними абонентів, так і ресурсу mobua.net [7], не має суцільного характеру (рис. 1.8).

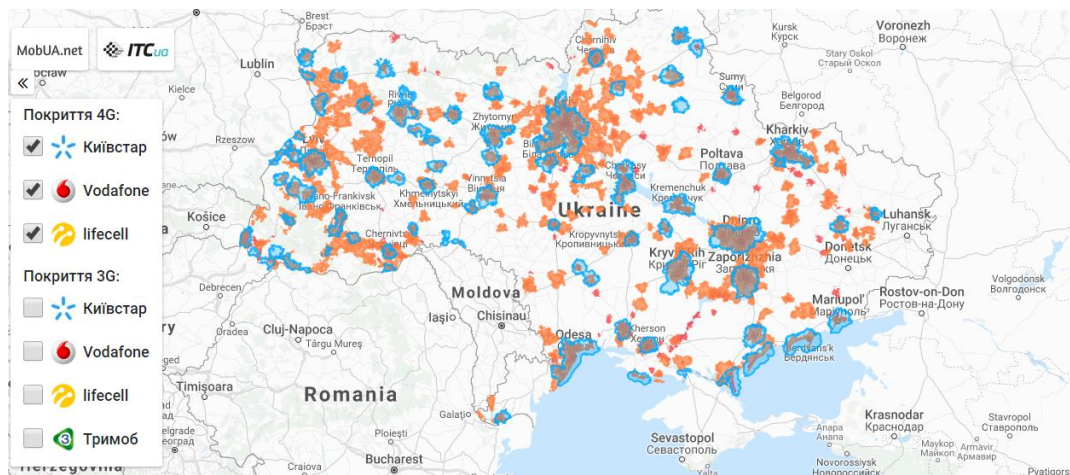


Рис. 1.8. Покриття операторів 4G в Україні

Швидкості передачі даних також перебувають на досить низькому рівні – явно нижче заявлених у вимогах до мереж 4G. Пікові швидкості по каналу downlink були найвищими у Київстар та сягали близько 100 Мбіт/с в ідеальних умовах. В таблиці 1.4 приведені результати тестування мережі 4G від оператора Київстар [28].

Результати тестування 4G від «Київстар»

Час доби	Download, Мбіт/с	Upload, Мбіт/с	Ping, мс	Jitter, мс
10:09	26,0	32,2	20	11
09:18	22,9	7,68	15	4
17:43	16,8	10,9	14	5
22:36	47,1	38,4	14	2
04:35	27,5	3,79	13	3
14:11	77,2	19,0	14	3
10:15	24,4	12,1	14	2
10:46	11,1	11,0	15	3
16:21	34,4	30,7	12	9
18:41	10,9	21,9	13	15
22:54	31,5	12,4	14	6
02:15	46,1	30,7	13	6
19:41	16,3	14,9	17	4
01:45	14,2	30,3	12	5
19:31	32,5	30,3	13	4

Таким чином, аналізуючи дані з різноманітних ресурсів [28], проводячи експериментальні виміри, можна сміливо стверджувати, що якість обслуговування абонентів – цільова ефективність функціонування стільникової мережі (швидкість передавання даних, затримка, джитер) як в Україні зокрема, так і у більшості країн світу поки що вимагає значного підвищення. При цьому оператори стільникового зв'язку прагнуть зберегти свої інвестиції (підвищення економічної ефективності), оптимізуючи структури мереж та підвищуючи її технічну довершеність (технічна ефективність). Все це наблизить стільникові мережі до задоволення вимог 5G.

1.4. Аналіз механізмів забезпечення захищеності сучасних стільникових мереж

Наприклад, в [29, 30] та інших джерелах було показано, що існує безпеосередній зв'язок між параметрами ефективності функціонування

телекомунікаційних мереж та параметрами їх захищеності *IS*. Тому необхідно також провести аналіз сучасних механізмів захищеності стільникових мереж.

Разом із еволюцією технологій, що використовуються в стільникових мережах, еволюціонували і їх системи безпеки. Близько 25 років тому, коли були розроблені системи GSM, були стандартизовані й деякі функції безпеки, які враховували недоліки, виявлені у попередніх аналогових систем, та були спрямовані на боротьбу з виникаючими загрозами [31, 32].

При переході до мереж третього покоління, були зроблені подальші поліпшення систем безпеки. Приклади таких удосконалень включають в себе взаємну аутентифікацію для зменшення загроз, наприклад, підміни базових станцій, і переміщення шифрування вглиб мережі [32].

Коли було запущено мережі четвертого покоління LTE, одним з основних заходів безпеки стало повернення шифрування даних користувача до базової станції. Зокрема, також було введено більш складний ключ управління для захисту від потенційних фізичних зломів в базових станціях.

Архітектура системи безпеки в мережах LTE – це вже ціла підсистема стільникової мережі стандарту LTE, описана в технічних специфікаціях 3GPP TS 33.401 [33] і 3GPP TS 33.402 [34], яка включає набір методів, що дозволяють забезпечити безпечний зв'язок між вузлами мережі, конфіденційність і цілісність даних користувача. Дана архітектура була запропонована консорціумом 3GPP в 2008 році [35]. Поточна версія - Release 11 [36].

Коротко основні вимоги до механізмів безпеки технології LTE можна охарактеризувати наступним чином [37]:

- забезпечити як мінімум такий же рівень безпеки, як і в мережах типу 3G, не доставляючи незручності користувачам;
- забезпечити захист від Інтернет-атак;
- механізм безпеки для мереж LTE не повинен створювати перешкод для переходу зі стандарту 3G на стандарт LTE;
- забезпечити можливість подальшого використання програмно-апаратного модуля USIM (Universal Subscriber Identity Module, універсальна сім-карта).

В цілому, безпеки, пропоновані LTE дуже схожі на посилені заходи захисту 3G мереж, проте мають свої особливості [38]. На рис. 1.9 показана еволюція систем безпеки стільникових мереж.

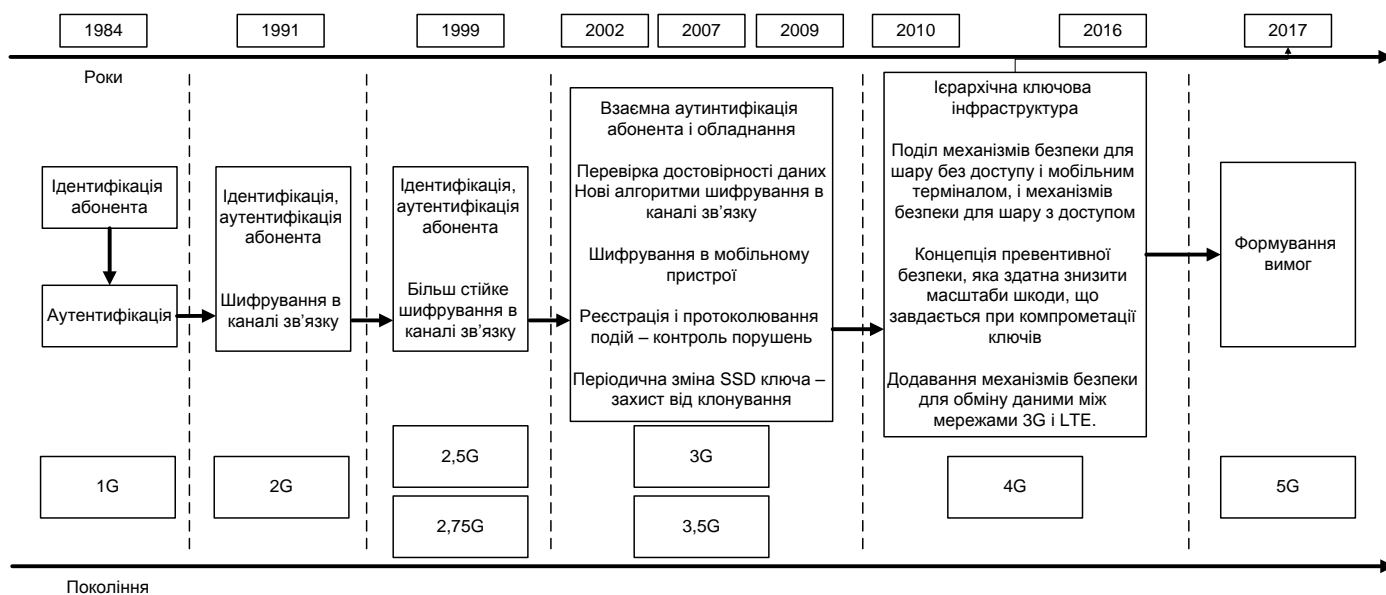


Рис. 1.9. Еволюція систем безпеки стільникових мереж

Для кожного наступного покоління ці системи були більш досконалішими, проте досі залишається дуже багато невирішених завдань. В таблиці 1.5 наведено порівняльну характеристику систем безпеки стільникових мереж 4-го покоління [39].

Таблиця 1.5

Порівняльний аналіз механізмів безпеки стільникових мереж 4G [39]

Властивості системи	LTE Rel 10	Wi-MAX Rel. 2
1. Ідентифікація мобільних користувачів	Використання ME/USIM; MME; протокол PDCP; ієрархія ключів EPS; алгоритм аутентифікації HMSC-SHA-1-96 з розміром ключа 160 та 512 біт; протоколи обміну ключами через мережу Інтернет IKEv1 та IKEv2	сертифікат X.509, ідентифікуючий абонентську станцію, а також сертифікат X.509, що ідентифікує виробника абонентської станції; 160-бітовий ключ авторизації (authorization key, АК); 4-бітовий ідентифікатор ключа авторизації; 128-бітовий ключ шифрування ключа (Key encryption key, KEK); Ключ HMAC для нисхідних (downlink) та висхідних (uplink) повідомлень при обміні ключами TEK; Список data SA, для яких дана

Властивості системи	LTE Rel 10	Wi-MAX Rel. 2
		абонентська станція авторизована; Privacy and Key Management Protocol; Extensible Authentication Protocol (EAP, розширюваний протокол аутентифікації)
2. Шифрування даних	AES-CBC зі 128-бітним ключем; 3DES-CBC з 3x64 бітним ключем	DES, AES
3. Протоколи управління безпекою	Encapsulating security payload; ESP	PKM (privacy and key management protocol)

1.5. Формування та аналіз вимог до стільникових мереж нового покоління

1.5.1. Вимоги до ефективності функціонування стільникових мереж

У зв'язку з розвитком технологій, а також з появою нових, більш вдосконалених мобільних пристроїв, які надають користувачам більше можливостей, з'являється необхідність у наявності високошвидкісного бездротового інтернет з'єднання [39, 40]. Сучасні смартфони, планшетні ПК, ноутбуки та інші «розумні» пристрої надають користувачам нові можливості. Завдяки цьому з'являється попит на більш швидкісний зв'язок. Так, завдяки цьому, сучасні оператори мобільного зв'язку починають впроваджувати у свої мережі нові технології, які здатні надати абонентам необхідну швидкість з'єднання і якість зв'язку. Однією з таких технологій є LTE. На даному етапі свого розвитку існує більше трьохсот комерційних мереж LTE. Але, не дивлячись на всі переваги, аналітики розуміють, що на зміну LTE за оцінками експертів після 2020 року мають прийти мережі 5-го покоління – 5G [40, 41]. Вони повинні будуть враховувати всі недоліки мереж попередніх поколінь. Тому метою даною роботи є дослідження недоліків мереж LTE та визначення основних трендів, за якими мають розвиватись перспективні безпроводові технології на шляху до 5G. На рисунку 1.10 представлені основні напрямки

розвитку безпроводових мереж, які відображають як побажання користувачів, так і операторів стільникового зв'язку [42].

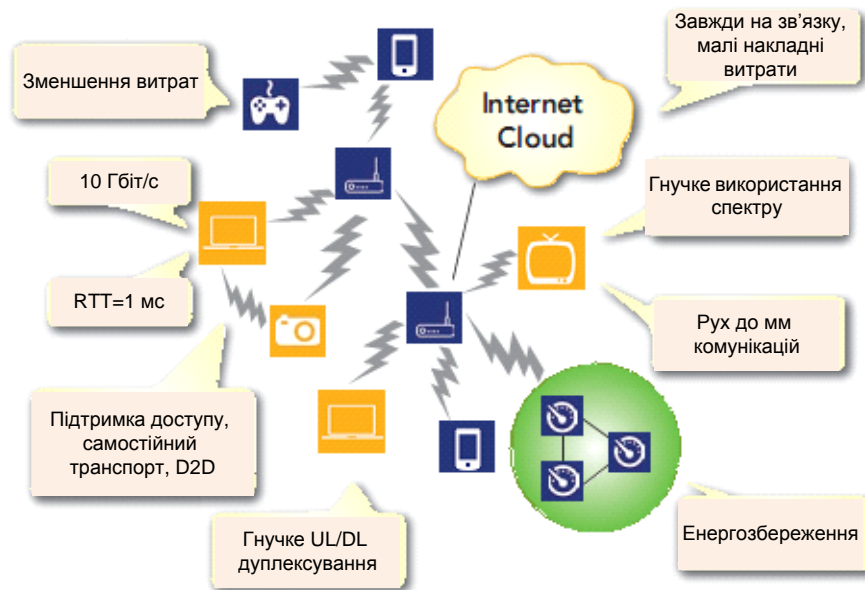


Рис. 1.10. Шляхи розвитку стільникових мереж зв'язку

Для належної підтримки нових широкосмугових технологій радіодоступу в транспортних мережах повинна бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та забезпеченні якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку.

Класична транспортна мережа оператора стільникового зв'язку складається з двох основних сегментів:

- розподільної мережі (backhaul), що зв'язує базові станції з контролерами і центрами комутації рухомого зв'язку Mobile Switching Center (MSC);
- магістральної мережі (backbone), що забезпечує високошвидкісний транспорт між центрами комутації.

Сучасні транспортні мережі повинні бути універсальні, тобто здатні ефективно підтримувати як експлуатовані сьогодні системи 2G і 2,5G, орієнтовані на передачу трафіку в режимі TDM (Time Division Multiplexing), так і мережі наступного покоління – 3G, 4G і навіть 5G. Тому обладнання транспортних мереж має забезпечувати ефективну передачу всіх типів трафіку,

враховуючи, що в майбутньому планується залишити тільки IP-трафік в архітектурі All-over-IP.

Таким чином, оптимальна транспортна мережа повинна відповідати ряду критеріїв [41]:

- забезпечувати впровадження нових систем мобільного зв'язку і підтримку наявних (збереження вкладених інвестицій);
- відповідати вимогам архітектур мереж наступного покоління;
- мати ефективні засоби управління трафіком і забезпечення якості обслуговування;
- надавати зручні засоби технічного обслуговування та експлуатації.

5G – це нове покоління радіосистем і мережевої архітектури, яке буде представляти собою максимально можливий широкосмуговий доступ, ультра-надійність, малий час затримки підключення і масивні мережі для користувачів та Інтернету речей.

5G – набагато більше, ніж просто нова технологія радіозв'язку. Вона буде поєднувати в собі існуючі технології радіодоступу з новими, оптимізованими для конкретних смуг частот і розгортання мереж, сценаріїв і варіантів використання. 5G також буде використовувати принципово нову мережеву архітектуру, засновану на технологіях Network Function Virtualization (NFV) [44] і SDN [44 – 46]. Програмованість матиме ключове значення для досягнення гіпер-гнучкості, так як стільниковим операторам потрібно буде підтримувати нові вимоги зв'язку, що висуватимуться до них від широкого кола користувачів, пристроїв, компаній з різних галузей промисловості та інших організацій. Мережі 5G повинні бути програмованими, програмно забезпеченими і управлятися цілісно, щоб забезпечити різноманітний і вигідний спектр послуг.

Визначають п'ять ключових аспектів, які описують трансформацію сучасних комунікацій в епоху 5G [41]:

- *Можливості* визначають нові вимоги, які повинна підтримувати технологія 5G і нові ресурси, які вона створить.

- *Універсальна радіосистема* досліджує різні технології радіодоступу, які в сукупності забезпечують ультра-гнучке підключення.

- *Система систем* визначає архітектуру мережі, яка буде необхідна, коли вона буде підтримувати нові вимоги і надійний захист, які очікують користувачі та підприємства з різних галузей.

- *Практичність* пропонує основні етапи розвитку 5G і як оператори зв'язку зможуть розгорнути мережі в найбільш ефективний спосіб.

- *Потенціал* описує, як нова комунікаційна ера 5G змінить повсякденне життя людей, різні галузі промисловості і весь бізнес стане провайдером зв'язку.

Найбільша різниця між 5G і успадкованими проектними вимогами є різноманітність сценаріїв використання, котрі мережі 5G повинні підтримувати в порівнянні з сучасними мережами, які були розроблені в першу чергу для забезпечення високошвидкісного ширококутового стільникового зв'язку. Проте, 5G буде для людей і речей, які можуть бути широко розділені на три категорії використання:

- *Масивний ширококутовий доступ*, що забезпечує гігабайт трафіку за потреби.

- *Наднадійний зв'язок з пристроєм*, що вимагає негайну eye-to-hand зворотну синхронізацію для дистанційного керування роботами і забезпечення Tactile Internet.

- *Широкомасштабний зв'язок з пристроєм*, який забезпечує з'єднання мільярдів сенсорів і пристроїв.

Нове 5-е покоління стільникових пристроїв буде побудовано навколо двох основних принципів проектування, якими керуються всі вимоги і технічні рішення.

Ключовим принципом проектування мереж 5G є гнучкість, для підтримання невідомих видів використання, які неминуче виникнуть в майбутньому. Випадки використання для 5G будуть більш різноманітними, ніж

будь-коли, і вимагатимуть дуже різноманітні характеристики каналу зв'язку. Ось деякі приклади [41]:

- *Масові передачі даних* вимагають великих розмірів пакетів і багато виділених ресурсів.

- *Нестационарні датчики* потребують тільки невеликі розміри пакетів і рідкісні виділенні ресурси, але в свою чергу, вимагають ефективний режим сну батареї.

- *Гнучка адаптація до швидких змін трафіку* у висхідній та низхідній лініях зв'язку.

- *Потокове відео* вимагає узгодження затримки зі швидкістю передачі даних.

Таким чином, системи зв'язку після 2020 року повинні бути досить гнучкими, щоб бути здатними вмістити всі різні варіанти використання без збільшення складності управління.

Ще одна причина того, що гнучкість – перший ключовий принцип проектування 5G є те, що будь-яка нова технологія або система, яку розробляють для 5G повинна бути в майбутньому виправдана і використовуватись щонайменше до 2030 року. Це означає, що людство малоймовірно може в даний час передбачити всі майбутні випадки використання. Тому, нові компоненти 5G необхідно розроблятися таким чином, щоб була змога відносно легко розширити їх для пристосування до невідомих на цей час сценаріїв.

Надійність ще один ключовий принцип проектування. Гнучка інтеграція різних технологічних компонентів буде рухати мережі від кращого стільникового ширококутового зв'язку в напрямку дійсно надійного зв'язку. Надійність це не тільки доступне оснащення, вона також включає в себе сприйняття нескінченної пропускну здатності та покриття, котрі майбутні стільникові мережі будуть забезпечувати в будь-який час і в будь-якому місці. Це означає, що для всіх випадків використання і переважної більшості

користувачів, необхідні дані будуть отримані у встановлений термін і не будуть залежати від технології, що використовується.

Крім того, надійність стає все більш важливою, оскільки ми покладаємо на стільниковий зв'язок функції контролю і безпеки. Надійне з'єднання може бути визначено як ймовірність правильного декодування певного пакета даних протягом певного періоду часу. Це означає, що повторна передача може бути необхідна для забезпечення прийому правильного пакету даних – це процес, який неминуче призведе до затримки передачі. Таким чином, навіть для отримання знаення затримок на рівні технології LTE з більш високою надійністю, буде потрібно викорисовувати нові методи та мережеві моделі.

Вважаючи надійність ключовим принципом проектування 5G впливає, що:

- вимога виражається у відсотках користувачів, а не місця/покриття, тому що навіть надійна мережа повинна бути економічно ефективною для постачальників послуг;

- механізми компромісу між надійністю зв'язку (низький рівень помилок пакетів), пропускнуою здатністю і/або затримкою повинні бути забезпечені за допомогою нових ефективних технічних рішень;

- кілька мережевих шарів і технологій радіодоступу використовуються для того, щоб забезпечити найбільш надійний зв'язок на основі потреб профілів користувача, місця розташування і мобільності.

Нова мережева архітектура буде мати важливе значення для задоволення потреб в період після 2020, для керування складними багат шаровими мульти-технологічними мережами, а також для досягнення вбудованої гнучкості. Ера мереж 5G буде програмованою, з керуванням програмного забезпеченням і цілісним управлінням.

Стільникові мережі 5G будуть зосереджені на якість обслуговування клієнтів і повинні бути побудовані навколо потреб користувачів (рис. 1.11) [47].

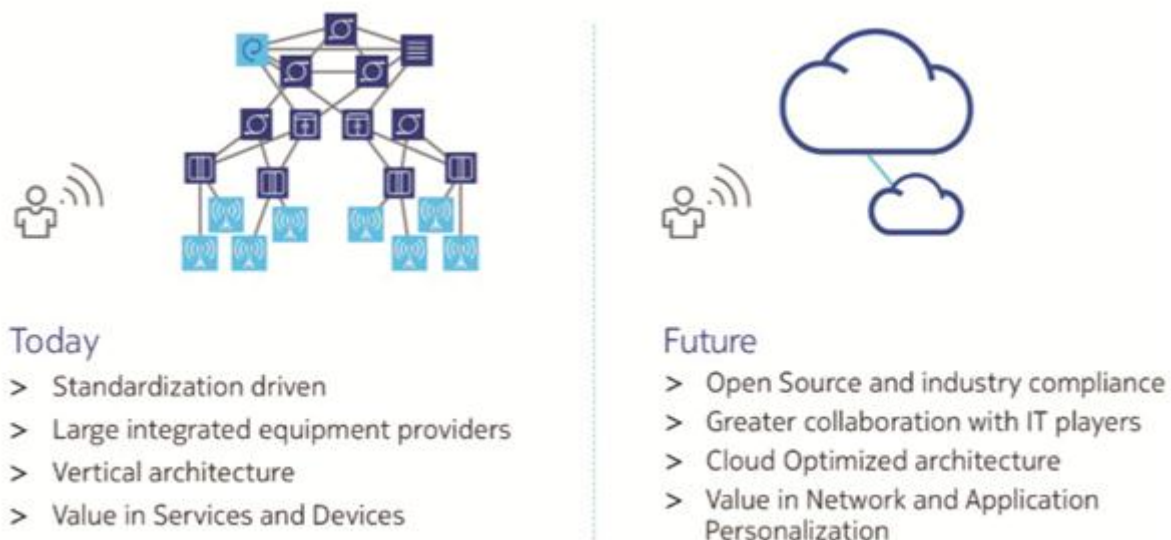


Рис. 1.11. Фундаментальні зміни у мережевій архітектурі стільникових мереж майбутнього

Вартість мереж буде залежати від їх персоніфікації і досвіду їх використання.

Мережі будуть пізнавати і оптимізувати себе автономно. Когнітивні мережі будуть використовувати великі аналітичні данні і штучний інтелект для вирішення складних завдань оптимізації в режимі реального часу і в передбачений спосіб [48]. Всі частини мережі будуть «хмарними», щоб використовувати існуючі ресурси найкращим чином. З більшим інтелектуальним розміщенням ближче до користувача і здатністю обробляти великі обсяги даних, продуктивність мережі можна буде прогнозувати і оптимізувати.

Ця мережева архітектура спричинить за собою повне використання відкритих програмних технологій, відповідність будь-якій галузі і більш тісне співробітництво з ІТ-стейкхолдерами. У той же час, органи по стандартизації та організації, такі як 3GPP і ETSI (European Telecommunications Standards Institute) будуть продовжувати допомогати визначити найкращий стандарт 5G, забезпечуючи сумісність щодо радіо інтерфейсу, відповідного програмного забезпечення і архітектури управління мобільністю [47].

Банально, тому що не можливо передбачити всі майбутні застосування, додатки і бізнес-моделі, мережа повинна бути гнучкою і масштабованою, щоб впоратися з невідомим.

Останні вимоги епохи мереж 5G в 2020 році і за її межами сформували архітектурне бачення майбутньої мережевої архітектури “Cognitive and cloud Optimized Network Evolution” (CONE) (рис. 1.12) [48, 49]. CONE включає в себе фундаментальні зміни з восьми мережевих доменів, як мобільних, так і фіксованих (рис. 1.12) [41, 49], та поєднує в собі топологічне уявлення радіодоступу і базових мереж з функціональною архітектурою з точки зору мережевих функцій, наведене нижче.

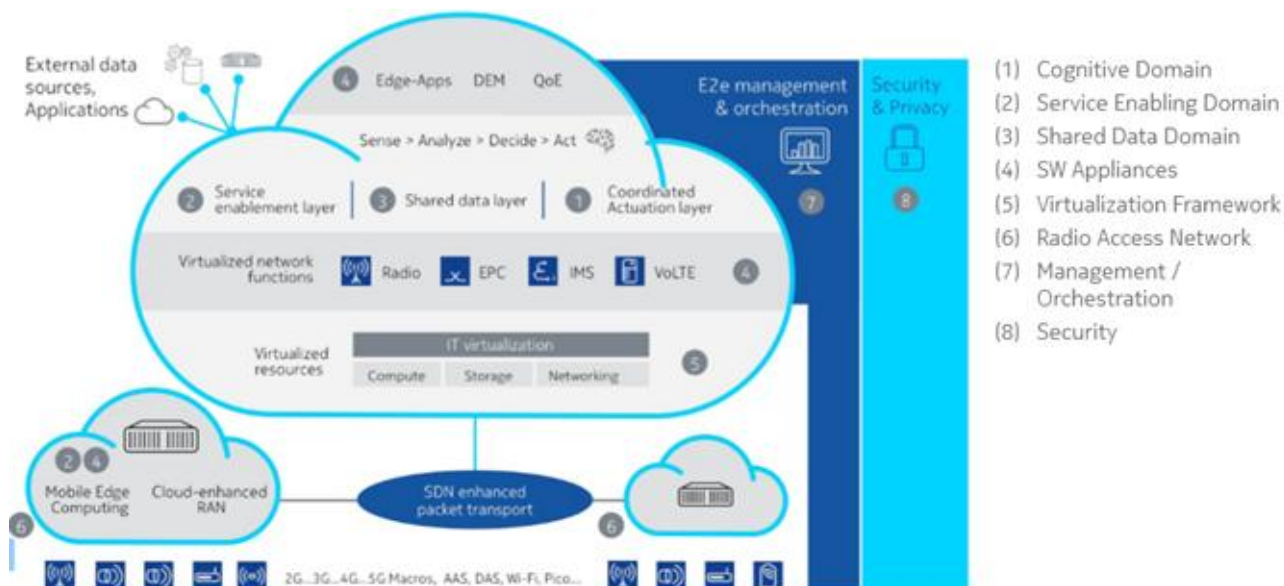


Рис.1.12. Архітектура CONE

Когнітивний домен. Когнітивний домен збирає дані і події з мережі і, при необхідності, з зовнішніх джерел, таких як соціальні мережі. Ці дані можуть бути оброблені в режимі реального часу, щоб витягти відповідну інформацію, а також зберігатися в автономному режимі для подальшої обробки. Програми отримують доступ до даних через домен обміну даними. Аналіз даних показує і інтерпретує різні моделі, наприклад, щоб знайти причину проблем і виявлення будь-яких наслідків для клієнтів чи бізнес-оператора.

Висновки цих аналітичних звітів повідомляються і автоматично переводяться у відповідні дії. Для запобігання конфліктів між діями, ініційованими різними додатками вони координуються доменом узгодження дій [50].

Для побудови когнітивного домену, потрібно включити багато нових функцій мереж, що самоорганізуються (SON (Self Organized Network)) [51, 52] в продукти, а також Dynamic Management Experience (DEM) [53].

Домен для надання послуг. Використовуючи даний домен, оператори можуть дозволити керований і безпечний доступ до їхніх мереж уповноваженим третім особам, що дозволяє їм впроваджувати інноваційні, пізнавальні програми та сервіси для стільникових споживачів, підприємств і вертикальних сегментів. Домен надає пакет засобів розробки програмного забезпечення (SDK) для полегшення проектування додатків, виділення ресурсів, тестування, складання звітів, аналітики та інтеграції в платформу. Наприклад, Інструкція з пропускової здатності в області MEC (Mobile Edge Computing), вже забезпечує керований доступ до мережі для будь-якого виду застосування, щоб забезпечити найкращу продуктивність [54, 55].

Домен обміну даними. Shared Data Domain (SDD) виступає в якості загального сховища даних для забезпечення загального доступу до даних для додатків з різних доменів оператора. Мета полягає в тому, щоб усунути копії даних конкретного додатка, коли це можливо і забезпечити узгоджений набір ключових показників ефективності (KPI).

Крім забезпечення гнучкого доступу до даних, SDD також має механізми забезпечення безпеки і конфіденційності, щоб гарантувати, що тільки авторизовані додатки мають доступ до захищених даних. Аутентифікація і авторизація, а також обмеження доступу до людей, забезпечує безпеку і конфіденційність даних.

Програмне забезпечення пристроїв екосистеми 5G. В архітектурі CONE всі фізичні ресурси, необхідні для реалізації будь-якого елемента мережі віртуалізовані і запропоновані "як послуга", доступні через менеджер

інфраструктури. Всі мережеві функції і сервіси будуються з програмного забезпечення, наприклад: сховище абонента, голосовий сервер, LTE-SW, брандмауер на транспортному рівні IP, функціональність SON, і багато інших. Так елементи EPC, передача голосу по LTE та інші послуги зв'язку вже реалізовані в повністю віртуалізованому середовищі.

Як вже відзначалося, віртуалізація є ключовим фактором для бездротової мережевої архітектури наступного покоління. Бачення полягає в максимізації використання платформ обробки загального призначення для розміщення різних мережевих функцій від ядра до RAN у вигляді функцій віртуальних мереж (VNFs) [56].

Домен віртуалізації. Домен віртуалізації включає в себе площину виконання і площину автоматизації [57]. Площина виконання складається з набору ресурсів (обчислювальних, мережевих, сховищ), які можуть бути доступні мережевими функціями через рівень віртуалізації. Площина автоматизації забезпечує автоматизоване управління площиною виконання, за допомогою таких операцій, як створення, видалення і масштабування мережевих функцій та розподілу основних ресурсів.

Мережа радіодоступу. Хоча Radio Access network (RAN) залишається ключовим фактором повсюдного бездротового зв'язку, значні зміни очікуються протягом найближчих років. Нова архітектура 5G буде інтегрувати існуючі та нові технології, доповнюючи мережі LTE. 5G включатиме в себе існуючі системи, такі як LTEAdvanced і Wi-Fi, в поєднанні з революційними технологіями ультра щільного розгортання, зв'язком з пристроями, високою надійністю зв'язку та мінімальними затримками. Важливо зменшити кількість нових радіоінтерфейсів, щоб переконатися, що нові радіостанції повністю взаємодіють одна з одною і з існуючими технологіями.

Значно підвищена пропускна здатність і надзвичайно низькі вимоги до затримок вимагають дуже щільних мереж на додаток до більшої ширини спектра. Проте, є економічно недоцільним будувати надщільні мережі скрізь, а

малий час затримки і/або гігабітне підключення будуть необхідні тільки в певних випадках.

Взаємодія та управління. У повністю хмарній мережі існує кілька рівнів і типів взаємодії. Вони включають в себе послуги взаємодії для послуг, розроблених оператором і назначених користувачам; управління хмарних послуг і наявних ресурсів, які виконуються віртуалізованим доменом управління інфраструктурою.

Безпека та конфіденційність. Вкрай важливо вжити заходів для захисту мережі від загроз. Ці загрози повинні бути терміново виявлені, щоб зменшити їх вплив. Така швидка реакція вимагає архітектури, яка є багатовимірною, згуртованою та цілісною, що з'єднує між собою безпеку, конфіденційність та мережеві події.

Обмін інформацією про загрози, порушення і пов'язаних з ними рішення має вирішальне значення, не тільки з клієнтами і партнерами по екосистемі, але з регуляторами і потенційними конкурентами. Ця відкритість потрібна, так як всі домени страждають від кібер-загроз.

Основні принципи, на яких заснована безпека і конфіденційність архітектури це постійний моніторинг; збільшення автоматизації збору даних, аналізу і реагування; та оцінка загроз, які перебувають за межами мережі [31].

Системна інтеграція. Ультра щільна мережа майбутнього буде в середньому мати всього кілька користувачів в одному стільнику, для яких вимоги 5G повинні бути виконані в будь-який момент часу. Проте, користувачі повинні використовувати широкий спектр різноманітних послуг та додатків з різними вимогами до якості передачі даних. Отже, мережа повинна гнучко адаптуватися до цих умов в кожному стільнику.

Ця архітектура дає переваги з точки зору мобільності і надійності, так як пристрій має фіксовану точку прив'язки для великої площі і кількість подій мобільності значно знижується.

1.5.2. Вимоги до систем безпеки стільникових мереж

Отже, не дивлячись на всі переваги і на деякі недоліки в системах безпеки (табл. 1.6), аналітики в усьому світі розуміють, що на зміну LTE за оцінками експертів після 2020 року поступово приходять мережі 5-го покоління – 5G. Вони повинні будуть враховувати та відповідно усунути всі недоліки мереж попередніх поколінь.

Мережі п'ятого покоління вже потребують принципово нову модель забезпечення інформаційної безпеки, адже вони матимуть вже значно розширеніший функціонал. По-перше, вони будуть сконструйовані не лише для забезпечення потреб окремих людей та суспільства в цілому, а й для цілей об'єднання цілих індустрій (таких як фабрики, заводи, інтелектуальні системи, системи e-health тощо). Що характеризує стільникові мережі 5G, так це те, що вони набагато більше, ніж 4G, відіграватимуть роль в створенні принципово нового «електронного» суспільства. При цьому повний спектр систем безпеки, недоторканності приватного життя і стійкості буде проблемою, яка охоплює далеко не виключно технології 5G, а й все майбутнє «електронне» суспільство. Основні рушійні сили розвитку 5G можуть бути згруповані в чотири характеристики, кожна з яких має вплив на формування вимог для забезпечення безпеки і недоторканності приватного життя. Ці характеристики наступні: нові моделі довіри, нові моделі служби доставки, розширений перелік загроз, і збільшення рівня конфіденційності. Отже, ці характеристики впливають на те, як ми повинні підходити до формування вимог до систем безпеки та конфіденційності в мережах 5G [31, 32].

Нові моделі довіри. Цільові моделі постійно змінюються із плином часу. Як простий приклад, можна навести використання концепції BYOD (Bring Your Own Device) [58]. Раніше всі користувацькі пристрої можна було вважати такими, які заслуговували безперечної довіри, але всі вони були одного типу, видані і керувалися ІТ-відділом підприємства. Сьогодні користувачі хочуть використовувати свої пристрої, а, створюючи загрози пристрої залишити за межами корпоративних брандмауерів. Для сучасних мобільних систем, модель

довіри досить проста, і вона включає абонента (його термінал) і два оператора (домашню і гостьову мережі). Натомість мережі 5G спрямовані на підтримку нових бізнес-моделей і включають в себе нові ролі, а тому моделі довіри мають змінитися, породжуючи розширення вимог у таких областях, як аутентифікація між різними суб'єктами, підзвітність і безвідмовність.

Безпека для нових моделей надання послуг. Використання хмарних сервісів і віртуалізації підкреслює залежність від використання безпечного програмного забезпечення, і призводить до появи нового впливу на вимоги до систем безпеки. Сучасні системи, визначені в документації 3GPP, базуються на основі стандартних функціональних вузлів та абстрактних інтерфейсах для забезпечення взаємодії між ними, і, таким чином можуть забезпечити хорошу відправну точку для віртуалізації. Однак, дотепер пропрієтарне апаратне забезпечення досі часто використовується для цих вузлів і інтерфейсів. Така розв'язка апаратного та програмного забезпечення означає, що безпека телекомунікаційної мережі більше не може покладатися на конкретні атрибути безпеки виділеної телекомунікаційної апаратної платформа. З тієї ж причини, стандартні інтерфейси до обчислювальних/мережевих платформ, такі, як ті, що визначені ETSI в роботі їх мережесих функцій віртуалізації — необхідні для забезпечення керованого підходу до безпеки.

Розширений перелік загроз. Мережі 5G відіграватимуть ще більш центральну роль в якості критичної інфраструктури [59]. Багато людей вже випробували випадки, коли всі види зв'язку переставали надаватися одночасно, наприклад, внаслідок дії природних катаклізмів. І суспільство точно не хоче втрачати подачу електроенергії, мобільну телефонію тощо в одночасно. Крім того, великі проблеми, такі як збільшення загроз кібертероризму, тіньової економіки, електронного шахрайства, також створюються за рахунок нових можливостей мереж 5G.

Збільшення недоторканності приватного життя. Захист персональних даних було обговорено в рамках програм Європейського Союзу. В даний час ця проблема розглядається в органах стандартизації, таких як 3GPP і IETF (Internet

Engineering Task Force), обговорюються на багатьох інших форумах. Таким чином, можемо бачити, що мережі 5G через свою майбутню роль мають стати дійсно одними із найзахищеніших.

Отже, розглянемо ключові напрямки удосконалення систем безпеки стільникових мереж 5G [32].

Забезпечення безпеки. Як вже було відзначено, цілком імовірно, що мережі 5G відіграватимуть найбільш центральну роль в якості критичної інфраструктури в порівнянні з попередніми поколіннями, і тому забезпечення безпеки буде дуже критичним. У проекті 3GPP вже спостерігається необхідність розширення характеристики безпеки від функціональних одиниць для інтерфейсів до специфікацій забезпечених на реалізованих вузлах/інтерфейсах, і тому 3GPP приступило до роботи над розробкою методології забезпечення безпеки SECAM [60]. Тим не менш, у поєднанні з реалізацією на основі хмари є необхідність, швидше за все відокремити гарантування безпеки програмних додатків, більш конкретно від гарантування безпеки самої платформи, і дозволити проведення на вимогу визначення забезпечення рівня безпеки в рамках укладених угод про рівень обслуговування (SLA). Що стосується ролі 5G мереж як критичної інфраструктури, рішення має бути прийнято, на скільки важливо це і повинно бути. Стандартна гарантія для IT-продуктів заключена в Загальних Критеріях (ISO 15408) [61]. Якщо 5G мають стати спільною платформою для створення суцільного Мережевого суспільства [62, 63], здається, ясно, що Загальні Критерії можуть бути введені в якості додаткових вимог до забезпечення безпеки у верхній частині SECAM. Припустимо, що в деяких випадках застосування, транспортних засобів / безпеки дорожнього руху буде залежати від мережі 5G безпеку. Сьогодні, автомобільні системи, пов'язані з безпекою повинні відповідати ряду стандартів, наприклад, ISO 26262 [64]. Так само, сектор охорони здоров'я, в тому числі e-health [65] регулюється стандартами, такими як ISO 27799 [66], а в США, наприклад, HIPAA [67]. Для розумних ліній електропередач, безпека забезпечується у відповідності зі стандартами від IEEE, IEC (Міжнародна

електротехнічна комісія) і NIST (Національний інститут стандартів і технологій). Тому виникає логічне запитання, чи вимагають 5G інших стандартів, якщо будуть задіяні в контурі управління даними критичними інфраструктурами. Відзначають, принаймні, два способи розв'язку цього запитання. По-перше, розшарування мережі може стати важливим інструментом для обробки дуже різноманітних вимог різних додатків і користувацьких груп. Розшарування часто розглядається як спосіб забезпечення ізолюваності підмереж, кожна з яких оптимізована для конкретних типів характеристик трафіку. Однією із таких може бути характеристика, пов'язана з вимогами безпеки. При наявності правильно реалізованих, із високим ступенем надійності механізмів ізоляції, можна буде обмежити вплив вимог до систем безпеки кожного рівня (шару), а не всієї мережі. По-друге, у нас є вибір, щоб «винести» вимоги безпеки із мережевих рівнів 5G і просто покласти відповідальність на кінцеві вузли; іншими словами, на підключені пристрої або центри обробки даних. Забезпечення безпеки даних є прикладом служби, які можуть надаватися таким способом. Таким чином, той факт, що 5G призначені для платформи широкого кола користувачів і додатків не означає, що треба (або навіть бажано) для 5G нести всю відповідальність безпеки і пов'язані з цими витрати. З іншого боку, 5G мережі можуть забезпечувати деякі додаткові послуги безпеки.

Управління ідентифікацією. Стандарт 4G LTE вимагає наявність USIM, щоб отримати доступ до мережі. Цей спосіб доступу, принаймні на початку, буде невід'ємною частиною 5G з таких причин, як високий рівень безпеки і зручність. Вбудовані SIM також значно знижують складність розгортання мереж, пов'язаних із зв'язком машина-машина. Тим не менш, існує загальна тенденція приносити власний спосіб ідентифікації (наприклад, із концепції BYOD), що для 5G надасть переваги від більш відкритої архітектури управління ідентифікацією, яка надасть багато різних альтернатив. Одним із прикладів може бути підприємство з існуючими власними рішеннями для управління безпечними ідентифікаторами (ID), що можуть бути повторно

використані для доступу до мереж 5G. Розглядаючи нові шляхи для встановлення ідентичності пристроїв/абонентів, можна стверджувати, що вони є ключовим фактором який безперечно має увійти до нових моделей довіри для 5G. Загроза перехоплення IMSI (International Mobile Subscriber Identifier) залишається достатньо високою, тому робота в даному напрямку для посилення захисту IMSI заслуговує уваги для 5G в майбутньому.

Безпека радіомережі 5G. У зв'язку із розширеною кількістю загроз і нових технологій, що забезпечує користувачам альтернативне програмування своїх власних пристроїв (навіть на рівні радіодоступу), захист від атак на радіо мережі повинен бути більш чітко вираженим в новій архітектурі мереж 5G, що має враховувати захист від загроз таких як DoS (відмова в обслуговуванні) через потенційно некоректно працюючі пристрої і додаючи заходів з пом'якшення наслідків нового дизайну радіопротокола. Хоча радіомережі LTE мають відмінний захист від криптографічного підслуховування, немає ніякого захисту проти зміни або ін'єкцій трафіку в площині абонента. Тому в 5G цей напрям досліджень також заслуговує значної уваги, особливо зважаючи на важливі можливі застосування 5G.

Гнучка і масштабована архітектура безпеки. У зв'язку із можливістю віртуалізації і більш динамічної конфігурацій, що входять до бачення 5G, здається логічним, розглянути більш динамічну і гнучку архітектуру безпеки для неї. Безпека для синхронних аспектів, таких, як сигналізація RAN, може бути розташована поряд з доступом з високим ступенем незалежності від асинхронних аспектів безпеки, таких як ті, що пов'язані з користувацькою площиною. Це дозволить більш ефективно забезпечення безпеки, а також обмежить загрози для чутливої користувацької інформації в той же час. Нові проекти безпеки з високим рівнем гнучкості можуть також краще слугувати для вирішення непотрібних конфліктів між зручністю і безпекою.

Енергоефективна безпека. У той час, як сервіси забезпечення безпеки пов'язані із витратами, це не являється більше проблемою для мобільних телефонів і аналогічних пристроїв. Витрати енергії на шифрування одного біту

в один або два рази менше величини витрат на передачу одного біта [68]. Тим не менш, для найбільш енергонезалежних пристроїв з необхідним тривалим часом роботи, може виникнути необхідність розглянути ще більш простіші рішення.

Хмарна безпека. Забезпечення хмарної безпеки вже надзвичайно гаряча тема, і вона безперечно буде додана до списку проблем 5G [69, 70]. Наведемо тільки короткий перелік пріоритетів для забезпечення хмарної безпеки в контексті 5G, керуючись вище викладеним матеріалом:

- Розробка гіпервізорів і віртуалізації мережі з високим рівнем гарантії ізоляції.

- Забезпечення більш ефективних рішень для шифрування даних, дружніх для хмар (гомоморфне шифрування, що дозволяє виконувати операції по шифрованих даних).

- Розробка простих у використанні, надійних в управлінні хмарних систем і додатків, які працюють на них.

Таким чином, були проаналізовані системи безпеки стільникових мереж. В результаті проведених досліджень стало зрозумілим, що мережі 5G відіграватимуть в майбутньому поки що найбільш значущу роль в формуванні електронного суспільства, критичної інфраструктури тощо. Тому дуже актуальними і важливими є питання, пов'язані із забезпеченням інформаційної безпеки в майбутніх мережах 5G. Основні рушійні сили розвитку 5G, згруповані в чотири основні характеристики (нові моделі довіри, нові моделі служби доставки, розширений перелік загроз, і збільшення рівня конфіденційності) створюють визначальний вплив на підходи щодо формування вимог до систем безпеки та конфіденційності в мережах 5G. Тому були сформульовані ключові напрямки удосконалення систем безпеки стільникових мереж (управління ідентифікацією, безпека радіомережі, підвищення енергоефективності, гнучка і масштабована архітектура, безпека хмарних сервісів тощо), що дозволило обґрунтувати необхідність проведення подальших досліджень, пов'язаних із оптимізацією захисту мереж 5G.

Таким чином, на рис. 1.13 [32] наведені основні напрямки, за якими має відбуватись удосконалення систем безпеки стільникових мереж

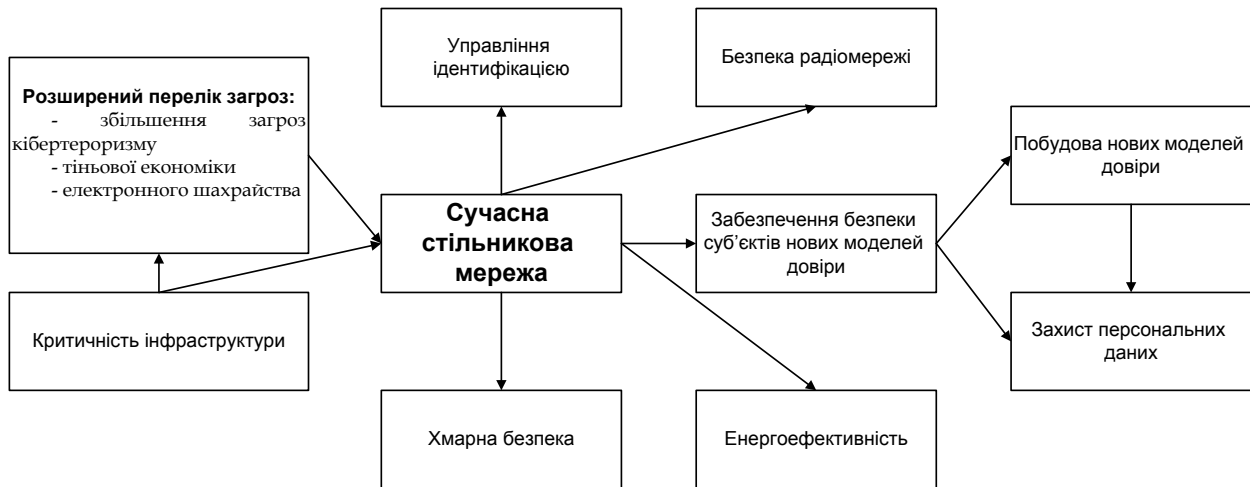


Рис. 1.13. Напрямки удосконалення систем безпеки стільникових мереж

1.6. Дослідження недоліків архітектурних рішень стільникових мереж

Оскільки, як показав аналіз, проведений в підрозділі 1.3, ефективність функціонування сучасних стільникових мереж, зокрема, реалізованих проектів, перебуває на досить низькому рівні, тому було прийняте рішення проаналізувати проблемні місця цих мереж. Таким чином, необхідно проаналізувати недоліки підсистеми базових станцій (БС) та транспортних сегментів стільникових мереж.

1.6.1. Недоліки підсистеми базових станцій

Недоліки базових станцій можна розділити на три категорії [71]:

- Проблеми з монтажем і експлуатацією БС.
- Економічні проблеми, пов'язані з БС.
- Технологічні проблеми БС.

Проаналізуємо вищезгадані проблеми більш детально.

Проблеми з монтажем обладнання для нових стандартів. Першою проблемою, яку має вирішити оператор мобільного зв'язку при монтажі БС – це місце розміщення нових антен. На вежах та щоглах мобільного оператора вже

розміщені антени 2G, зазвичай, в два ряди – на верхньому антени стандарту GSM-900, на нижньому – стандарту GSM-1800. При монтуванні антен стандарту 3G UMTS та 4G LTE на існуючих баштах чи щоглах виникає необхідність встановлювати їх під існуючими антенами.

У зв'язку з цим оператор стикається з цілим рядом проблем збільшення навантаження на опору. В деяких випадках це призводить до вимушеного пониження висоти антени, а в деяких – до неможливості встановити антену на існуючу опору через обмежену несучу здатність конструкції. В останньому випадку необхідно або споруджувати нову опору або укріплювати існуючу, що несе за собою чималі грошові витрати.

Другою проблемою є необхідність будувати антенно-фідерний тракт від радіомодуля до антен та споруджувати фідерні траси при підключенні «feederline»; монтувати радіо модулі на опору при підключенні «feederless». Все це також значно збільшує навантаження на опору, що призводить до вищезгаданих негативних наслідків.

Третьою проблемою є великі габарити і вага обладнання базових станцій. Через це часто виникають складнощі при виникненні необхідності в розширенні обладнання.

Фінансові проблеми. При монтажі нових антен на орендованих спорудах часто необхідно сплачувати орендну плату за антенномісця.

Як було згадано вище, якщо встановити антени на існуючих опорах не можливо, то необхідно або укріплювати опори або монтувати нові, що вимагає грошових затрат. Якщо антену неможливо встановити на опорі, що знаходиться на даху, то для спорудження додаткової опори необхідно також орендувати додаткові площі на даху. Це в свою чергу призводить до збільшення орендної плати.

В обох вищезгаданих випадках, окрім збільшення витрат, необхідно також заключення нових договорів. Цей процес є часозатратним для оператора і гальмує розвиток мережі.

Технологічні проблеми. Як було описано вище, якщо на існуючих конструкціях встановлені антени попередніх стандартів, то зазвичай необхідно встановлювати антену нижче за існуючі антени. Найчастіше, висота антени складає 2 метри. При цьому між антенами має бути хоча б 1 метр відстані, задля забезпечення електромагнітної ізоляції між антенами і для спрощення експлуатації антен. Звідси випливає, що фазовий центр антени стандарту UMTS буде щонайменш на 6 м нижче за існуючу найвищу антену. При цьому при встановленні в майбутньому на цю ж опору антени стандарту LTE її висота підвісу буде нижче вже щонайменше на 9 м.

Часто бувають випадки, що антени потрібно встановлювати нижче ніж на 6 м. Це може виникнути у одному чи у кількох з нижченаведених випадків:

- через велике навантаження на опору;
- через зменшення впливу відтяжок від щогли;
- через присутність на опорі антен інших операторів.

Пониження висоти підвісу антени значно зменшує потенційну площу покриття і тому є дуже небажаним для оператора, особливо в умовах міської забудови.

Іншою технологічною проблемою як нових, так і існуючих стандартів є затухання сигналу в фідерах. Це затухання значно зменшує потужність електромагнітного сигналу, який випромінює антена та сигналу, який антена приймає. Зменшення потужності (рівня) сигналу також призводить до зменшення площі покриття та до погіршення сервісу в існуючій зоні обслуговування.

Всі вищеокреслені проблеми створюють вплив на складність планування підсистем базових станцій операторів стільникового зв'язку. Тому необхідно проводити розробку нових моделей та методів, що дозволять врахувати технологічні обмеження та нададуть змогу оптимальним чином виконувати планування місця розташування базових станцій та з'єднання між ними.

1.6.2. Аналіз напрямів удосконалення транспортних мереж

У розвитку транспортних мереж можна відмітити наступні характерні особливості [72-73]:

- постійне зростання пропускної здатності, яке пов'язане зі збільшенням об'єму трафіка, який передається;
- все більш широке використання технологій пакетної комутації, які здатні підтримувати передачу всіх видів трафіка з заданими параметрами якості;
- управління смугою пропускання для кожного з'єднання при достатньо рідких запланованих змінах;
- повна прозорість трафіка, який передається (дані не змінюються, не аналізується їх зміст, дані одного користувача ізольовані від даних іншого, зберігається їхнє початкове впорядкування).

Існуюча інфраструктура транспортних мереж не завжди спроможна адекватно й ефективно реагувати на нові потреби користувачів мобільними послугами. Зростання кількості й різноманітності мобільних пристроїв, розвиток технологій бездротового зв'язку (Wi-Fi, 3G, Wi-MAX, LTE, 5G) призвели до того, що сьогодні число мобільних терміналів, яке припадає на одного користувача досягає трьох, а іноді може й більше. Однак мобільні бездротові мережі сьогодні стикаються з двома суперечливими тенденціями. Збільшення обчислювальної потужності мобільних терміналів тягне за собою збільшення обчислювальної ємності додатків, працюючих на них. Це в свою чергу призводить до збільшення вимог до пропускної здатності каналів мобільного зв'язку. На сьогодні обсяг мобільного трафіку зростає в геометричній прогресії, а види трафіку стають все більш різноманітними. Згідно даних компанії Cisco Systems трафік подвоюється приблизно кожні дев'ять місяців [74]. Це може призвести до збільшення навантаження у декілька разів протягом наступних декількох років. Згідно з даними компанії Cisco Systems, обсяг трафіку в мережі Інтернет за останні 5 років зріс в три рази [74]. На сьогодні його щорічне зростання складає близько 100%, тобто подвоюється. Ці цифри говорять про те, що пропускна здатність сучасних каналів зв'язку при

існуючих методах і засобах управління трафіком в мережах близька до вичерпання. Існуючі темпи збільшення пропускної здатності мережі будуть не в змозі задовольняти зростаючі потреби користувачів. Також підвищилася складність управління мережею, значно розширився перелік вирішуваних задач, їх значимість і критичність, підвищилися вимоги до безпеки і надійності мереж. Мережі будуються з використанням комутаторів, маршрутизаторів і інших пристроїв, які стали надзвичайно складними, оскільки вони здійснюють велике число складних розподілених протоколів. Стає все важче реалізувати підтримку й управління складною мережевою інфраструктурою.

Таким чином, виникають наступні проблеми керування транспортними мережами [73]:

- сьогодні спостерігається *складність* у контролюванні й передбаченні таких складних об'єктів, як глобальні мережі.

- сучасні мережі *дорогі й складні в обслуговуванні* та потребують висококваліфікованих спеціалістів.

- традиційні сервіси тільки неявно і побічно описують свої вимоги до мережі і, як правило, включають етапи адміністративного втручання людини, наприклад, прийняття рішення щодо підтримки даного сервісу, залежно від наявності достатніх ресурсів та політик управління.

- традиційні мережі не пропонують весь динамічний спектр потреб користувачів, таких як пропускна здатність, затримка, варіації затримки або доступність каналу. У заголовках пакетів міститься поле пріоритету, але зазвичай мережі не керуються даним маркуванням. Тому деякі мережі намагаються визначити вимоги самостійно, наприклад, шляхом аналізу трафіка. Такий підхід призводить до додаткових витрат, а також до некоректної класифікації трафіку.

- традиційні мережі не повідомляють інформацію та мережевий стан додаткам, які їх використовують. Таким чином, додатки не можуть відстежувати стан мережі і відповідним чином адаптуватися до її змін.

Таким чином, основними напрямками удосконалення транспортних мереж є розробка механізмів, методів та моделей для оптимізації потоків трафіку, а також підвищення ефективності керування даними мережами.

1.7. Дослідження основних напрямків підвищення ефективності стільникових мереж та постановка задач дослідження

У загальному випадку будь-яка сучасна стільникова мережа зв'язку складається із підмережі базових станцій, транспортного сегменту та системи керування цими мережами [75]. Тому в даному дослідженні пропонується проаналізувати окремо методи, які можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування кожного вище окресленого окремого сегменту та всієї мережі в цілому.

Розгортання будь-якої стільникової мережі починається із планування радіопідмережі. Проблемам планування стільникових мереж присвячено багато наукових праць [3, 13, 75-81]. Предметом розгляду даних робіт був процес планування, заснований на використанні здебільшого емпіричних моделей розповсюдження радіохвиль [82-84] для оцінки дальності зв'язку, проте не були враховані втрати в атмосферних газах, внаслідок дії кліматичних явищ тощо. Також вищеокреслені емпіричні моделі розповсюдження радіохвиль вже не здатні врахувати особливості поширення радіохвиль для всіх наявних діапазонів як для LTE, так і для 5G. Тому при такому плануванні могли виникнути додаткові не враховані обриви зв'язку під час експлуатації спроектованих мереж. Також в даних методах не враховується вибір стратегії розвитку оператора стільникового зв'язку, вибір обладнання, що не надає змогу проводити оцінку капітальних вкладень, а отже і ефективності їх використання.

Після планування радіомережі відбувається планування транспортного сегменту. Відомі методи [85-87] здебільшого стосуються планування вже застарілих, а тому мало використовуваних технологій транспортних мереж. У вітчизняній літературі планування транспортних мереж присвячені роботи [88-90]. Вони присвячені вибору оптимальної архітектури транспортних мереж з

урахуванням показників якості обслуговування за допомогою методів багатокритеріальної оптимізації. Проте, як показав детальний аналіз даних робіт, вони не враховують можливу багатошаровість транспортних мереж, їх неоднорідність, інтеграцію різних технологічних рішень тощо.

Оскільки вищерозглянуті методи не враховували ряд параметрів, то відповідно було не можливо точно встановити їх вартість.

Після того як стільникова мережа запущена і функціонує, то відбувається її безперервна оптимізація – зміна параметрів (структури) мережі з метою підвищення якості обслуговування абонентів та підвищення ефективності функціонування самої мережі (тобто забезпечення більш оптимального використання наявних ресурсів, наприклад, часових, частотних або просторових). Оптимізацію мереж стільникових операторів доцільно проводити по чергово на всіх її ділянках (спочатку безпроводовий сегмент, потім проводовий – транспортний). Праці [91-93] присвячені оптимізації окремих параметрів, наприклад сигнально-кодових конструкцій, параметрів радіосигналів. В праці [94], наприклад, розглянуто планування та оптимізацію широкосмугових систем мобільного зв'язку з урахуванням властивостей кодових послідовностей радіоінтерфейсів. А в [95] запропоновано метод оптимізації параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі. Проте дуже мала кількість праць присвячена оптимізації архітектури підсистеми базових станцій або транспортного сегменту, виходячи із потреб забезпечення необхідної якості обслуговування для різних груп абонентів та із урахуванням поточної архітектури. Тому даний напрямок досліджень є дуже перспективним. А комплексна оптимізація (одночасно радіопідмережа та транспортний сегмент) надасть змогу операторам більш ефективно використовувати наявні ресурси.

Для забезпечення можливості безперервної оптимізації та ефективного керування всією мережею 4G/5G наразі необхідно використовувати підходи SDN та NFV. Дуже велика кількість праць присвячена дослідженню перспектив використання даних технологічних рішень [96-99], їх проблемних місць [100-

101] тощо. Проте не розглядалось питання щодо оцінки комплексної ефективності використання мереж SDN для управління потоками в стільникових мережах в умовах розгортання нових сервісів.

Таким чином, проаналізувавши найбільш перспективні напрямки наукових досліджень для підвищення ефективності стільникових мереж, та з огляду на не вирішені завдання, можна провести постановку задач дослідження. В роботі почергово необхідно виконати наступне.

Спочатку треба провести удосконалення методів планування радіомережі з урахуванням вимог до якості обслуговування та продуктивності мережі, кліматичних умов, рельєфу місцевості та характеру забудови. Для проведення безперервної оптимізації стану мережі необхідно розробити метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж. Після цього необхідно розробити метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора та удосконалити метод розвантаження радіо інтерфейсу стільникової мережі із використанням безпроводових мереж та керуванням цим процесом за допомогою програмно-конфігурованих мереж. Наступною є розробка методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі. Для забезпечення безпеки необхідно розробити метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти у стільниковій мережі нового покоління. Після цього треба удосконалити методи маршрутизації із забезпеченням резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки та розробити метод оцінки ефективності програмно-конфігурованих мереж.

На основі вперше розроблених та удосконалених методів необхідно розробити методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. На її базі можна розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що дозволить верифікувати запропоновані методи, моделі та методологію і підтвердити їх ефективність.

Висновки до розділу 1

Дослідження, проведені в першому розділі, надали змогу отримати наступні результати.

1. В даному розділі було розглянуто еволюцію операторів стільникового зв'язку в Україні, окреслені основні тенденції розвитку радіотехнологій в світі та в Україні зокрема. Поява нових послуг і вдосконалення технічних можливостей пристроїв означає, що обсяги трафіку в стільникових мережах і споживчий попит на високошвидкісну передачу даних буде зростати з безпрецедентною швидкістю. Так, трафік даних в мережах мобільного широкосмугового зв'язку демонструє практично експоненціальне зростання. Останні кілька років стільниковий трафік демонструє стійке зростання, і ця тенденція продовжиться і в майбутньому. На підставі різних прогнозів можна зробити висновок, що після 2020 року ємність систем повинна буде забезпечувати обробку трафіку, що перевищує нинішній в обсязі більш ніж в 1000 разів. Зростання числа підключених пристроїв буде супроводжуватися появою нових способів їх застосування, що призведе до виникнення нових вимог до мереж, що варіюються залежно від пристрою і від конкретної мети використання.

2. При цьому за аналізом якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж LTE в світі та стільникових мереж 3G та 4G в Україні встановлено, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування радіомереж, транспортних підсистем, методів керування та забезпечення кібербезпеки.

3. Вартість розгортання, експлуатації та обслуговування мережі, а також вартість пристроїв, також повинні знаходитися на рівні досить низькому, щоб дозволити надавати популярні послуги з привабливою для користувача ціною, але в той же час – бути вигідними і для операторів мереж.

4. Таким чином, для того, щоб успішно впоратися із завданнями, описаними вище, потрібна розробка нових, більш досконалих і ефективних рішень для підвищення ефективності функціонування стільникових мереж. Ефективні і високопродуктивні рішення можуть бути реалізовані на базі стандарту 5G. Однак на шляху втілення цієї ідеї виникає ряд проблем та задач, які необхідно вирішити.

5. В першому розділі були окреслені шляхи вирішення проблеми підвищення ефективності та захищеності сучасних стільникових мереж. Спочатку необхідно удосконалити методи планування стільникових мереж, потім провести оптимізацію підсистеми базових станцій, оптимізацію транспортних мереж, удосконалення та оцінку засобів керування мережею стільникового оператора, удосконалення систем безпеки стільникових мереж, узагальнення розроблених методів та моделей у методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку та перевірка розробленої методології за допомогою проведення експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання.

6. Основні результати, висвітлені у даному розділі, оприлюднені в працях [31, 32, 39-41, 59, 71-73, 101-116].

Список використаних джерел у першому розділі

1. Мобільний зв'язок в Україні: веб-сайт. URL: <http://uateka.com/uk/article/society/1227/>
2. Єрохін В. Ф. Аналіз і прогноз розвитку систем мобільного зв'язку загального користування / В. Ф. Єрохін, Б. А. Гиндич, О. В. Кувшинов. — Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” № 1. — 2011. — С. 54–64.
3. Бойко М. П. Системи стільникового зв'язку : конспект лекцій. Одеса : ОНАЗ, 2004. 76 с.
4. Сети и Стандарты Мобильной Связи в Украине: веб-сайт. URL: <http://blog.jammer.su/2012/07/seti-standarty-mobilnojsvjazi-ukraina/>
5. Первую тестовую сеть LTE в Украине построит МТС: веб-сайт. URL: <http://podrobnosti.ua/667728-pervuju-testovuju-set-ltev-ukraine-postroit-mts.html>
6. Opensignal combines real-world measurements with scientific analysis to provide independent insights on mobile connectivity globally: веб-сайт. URL: <http://www.opensignal.com>
7. Зведена карта покриття всіх 4G/3G операторів України, мобільний 4G та 3G інтернет: веб-сайт. URL: <http://mobua.net>
8. Київстар, МТС і Астеліт купили 3G-ліцензії на загальну суму 8,77 млрд грн: веб-сайт. URL: http://www.business.ua/articles/media_view_ukr/Ki%D1%97vstar_MTS_%D1%96_Astel%D1%96t_kupili_Gl%D1%96cenz%D1%96%D1%97_na_zagalnu_sumu__mlrd_grn-89129/
9. Коротко про 4G: що це, навіщо, як підключити: веб-сайт. URL: <https://lviv.com/lab/korotko-pro-4g-shcho-tse-navishcho-iak-pidkliuchyty/>
10. "Плями" і брак sim-карт: запуск 4G зіткнувся з труднощами: веб-сайт. URL: <https://ukr.segodnya.ua/ukraine/pyatna-i-nehvatka-sim-kart-zapusk-4g-stolknulsya-s-trudnostyami-1127198.html>
11. Что такое UMTS и какой скоростью обладает?: веб-сайт. URL: <http://innotechnews.com/innovations/484-что-такое-umts>
12. IMT-Advanced (4G) Mobile wireless broadband on the anvil : веб-сайт. URL: http://itu.int/newsroom/press_releases/2009/48.html

13. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE. *Технологии и архитектура*. М.: Эко-Трендз. 2010. 284 с.

14. LTE Advanced позволяет осуществлять загрузку данных на скорости 1 Гб/с: веб-сайт. URL: http://itc.ua/news/lte_advanced_pozvolyaet_osushhestvlyat_zagruzku_dannyh_na_skorosti_1_gb_s_54248

15. ITU paves way for next-generation 4G mobile technologies : веб-сайт. URL: http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/40.aspx

16. LTE Network Architecture: веб-сайт. URL: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm

17. ITU global standard for international mobile telecommunications 'IMT-Advanced': URL: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-adv/Pages/default.aspx>

18. REPORT ITU-R M.2134. *Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)*: URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf

19. Recommendation ITU-R M.1645 (06/2003) *Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000*: URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1645-0-200306-I!!PDF-E.pdf

20. ETSI TR 136 913 V14.0.0 (2017-04) LTE: *Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)*: URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136913/09.00.00_60/tr_136913v090000p.pdf

21. Бовда Е.М., Сальник В.В. Методи забезпечення якості обслуговування в сучасних телекомунікаційних мережах військового призначення: *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. Вип.2 (51). С. 85-94

22. LTE Release 8: URL: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>

23. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: монографія. Вінниця : ВНТУ. 2015. 140 с.
24. Dr. Parag Pruthi NIKSUN Dr. Ashutosh Dutta NIKSUN. QoS Requirements for VoLTE. 2012. URL: https://www.gisfi.org/wg_documents/GISFI_SeON_201206278.pdf
25. lifecell запустив 4.5G у Львові — першим з мобільних операторів: веб-сайт. URL: <https://wz.lviv.ua/news/368402-lifecell-zapustyv-45g-u-lvovi-pershym-z-mobilnykh-operatoriv>
26. Мобільні оператори Vodafone і lifecell оголосили про запуск 4G в Україні. *Користувачі діляться першими враженнями*: веб-сайт. URL: https://sensor.net.ua/ua/photo_news/3058682/mobilni_operatory_vodafone_i_lifecell_ogolosyly_pro_zapusk_4g_v_ukrayini_korystuvachi_dilyatsya_pershymy
27. От быстрого к дешёвому — сравнительный тест 3G от украинских операторов: веб-сайт. URL: <https://www.imena.ua/blog/3g-mega-test/>
28. Побутово-вуличний тест 4G в Києві: що отримують користувачі нового зв'язку: веб-сайт. URL: <https://www.imena.ua/blog/4g-kyiv-test/>
29. Шаньгин В. Ф. Информационная безопасность компьютерных систем и сетей: учеб. пособие. М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2011. 416 с.
30. Олифер В.Г., Олифер Н.А.: Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. Питер. 2016. 992 с.
31. Одарченко Р.С. Обгрунтування основних вимог до систем безпеки стільникових мереж 5-го покоління. *Безпека інформації*. 2015. №3, т.21. С.102-106.
32. 16. Одарченко Р.С., Гнатюк В.О. Концептуальні засади підвищення рівня кібербезпеки сучасних стільникових мереж. *Захист інформації*. 2016. Вип. 22 (2). С. 143-149
33. The mobile broadband standard - 3GPP TS 33.401. URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/33401.htm>.

34. The mobile broadband standard - 3GPP TS 33.402. URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/33402.htm>.
35. SP-39 1.0.0 2008-03-20. URL: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/33401.htm>.
36. Rel-11 SP-57 2012-09-12. URL: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/33401.htm>
37. G security; Network Domain Security (NDS). *IP network layer security*: URL: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/33210.htm>.
38. Скорость и безопасность в LTE: веб-сайт. URL: <http://www.osp.ru/nets/2012/06/13032673/>.
39. Одарченко Р.С., Лукін С.Ю. Економічна ефективність впровадження систем захисту стільникових мереж 4G. Системи обробки інформації. *Інформаційна та економічна безпека: Збірник наук. праць Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба*. 2012. №4, т. 2 . С. 51-56.
39. Мережі стільникового зв'язку. *Навчальний портал НУБіП*: веб-сайт. URL: <http://elearn.nubip.edu.ua/mod/page/view.php?id=23714>
40. Одарченко Р.С. Стратегії розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні. *Наукоємні технології*. 2014. Вип. 2, т. 26. С. 141-148.
41. Одарченко Р. С., Абакумова А. О., Дика Н. В. Дослідження вимог до стільникових мереж нового покоління та можливості їх розгортання в Україні. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. №54, т. 2. С. 52-59.
42. Технологии мобильной связи пятого поколения (5G)/ ERICSSON: Аналитический доклад. 2013. 10 с. URL: https://www.ericsson.com/res/region_RECA/docs/whitepapers/wp-5g-ru.pdf
43. Network Functions Virtualization: веб-сайт. URL: <https://www.etsi.org/images/files/ETSITechnologyLeaflets/NetworkFunctionsVirtualization.pdf>
44. Сергей Орлов. SDN и другие . *Журнал сетевых решений*. 2014. № 06.

45. Черняк Л. SDN – от замысла до рынка. *Открытые системы*. 2012. № 09.
46. Смелянский Р. Программно-конфигурируемые сети . *Открытые системы*. 2012. № 09.
47. 5G Network Architecture. A High-Level Perspective: веб-сайт. URL: <https://www.huawei.com/minisite/hwmbbf16/insights/5G-Nework-Architecture-Whitepaper-en.pdf>
48. Patil S., Patil V., Bhat P. A Review on 5G Technology. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. 2012. Vol 1, Issue 1.
49. Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile. *ANALYSIS / GSMA Intelligence*. 2014. P.26
50. 5G Infrastructure Association: Vertical Sectors White Papers. URL: <https://5GPPP.eu/whitepapers/>
51. Self-Optimizing Networks: The Benefits of SON in LTE, October 2013
52. Smarter Self Organising Networks, Ericsson White paper, Feb 2012
53. 5G PPP 5G Architecture White Paper (July 2016, August 2017) 5G-PPP Cognitive Network Management for 5G White Paper (March 2017). URL: <https://5g-ppp.eu/white-papers/>
54. Mobile Edge Computing use cases & deployment options. White paper. Heavy reading, July 2016
55. Mobile Edge Computing A key technology towards 5G // Nurit Sprecher (Chair of ETSI MEC ISG) 5G World 2016, London, UK
56. Bercovich D., Contreras L. M., Haddad Y., Adam A., Bernardos C. J. Software-defined wireless transport networks for flexible mobile backhaul in 5g systems. *Mobile Networks and Applications*, 2015. Vol. 20, № 6. P. 793-801.
57. Thomas D. Nadeau, Ken Gray. SDN: Software Defined Networks: An Authoritative Review of Network Programmability Technologies O'Reilly Media. 2013. 384 p.
58. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Одарченко Р.С., Рибальченко Є.В., Марченко О.В., Шеремет Є.Ю., Лагодний О. В. Підвищення ефективності

використання корпоративної мережі за концепцією BYOD. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць. Житомир: ЖВІ НАУ. 2013. Вип.7. С. 57-67.

59. 5GPPP White Paper, “Specialized Services, Network Management and 5G. URL: <http://5GPPP.eu/wp-content/uploads/2015/06/Specialized-Services-NetworkManagement-and-5G.pdf>.

60. Security Assurance Methodology (SECAM) for 3GPP Nodes: Веб-сайт. URL: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1569-secam_for_3gpp_nodes.

61. Information technology. Security techniques . Evaluation criteria for IT security . Part 1: Introduction and general model URL: Режим доступу: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=50341.

62. Castells, Manuel and Cardoso, Gustavo, eds. The Network Society: From Knowledge to Policy. . Washington, DC: Johns Hopkins Center for Transatlantic Relations. 2005. P. 12-16.

63. Network society: веб-сайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_society.

64. Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary: веб-сайт. URL: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=43464.

65. eHealth: веб-сайт. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/EHealth>.

66. Health informatics — Information security management in health using ISO/IEC 27002: веб-сайт. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:27799:ed-1:v1:en>.

67. FHealth Insurance Portability and Accounting Act: веб-сайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Health_Insurance_Portability_and_Accountability_Act.

68. Margi C., Trevizan B., G. de Sousa, Simplicio M., Barreto P., Carvalho T., Nslund M., Gold R. Impact of Operating Systems on Wireless Sensor Networks (Security) Applications and Testbeds. 2010. P. 1-6.

69. Mantas G., Komninos N., Rodriuez J., Logota E. and Marques H. Security for 5G Communications. In: Rodriguez, J. (Ed.), *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. 2015. P. 207-220.

70. Patrick Nelson 5G and 6G wireless technologies have security issues: веб-сайт. URL: <https://www.networkworld.com/article/3315626/network-security/5g-and-6g-wireless-technologies-have-security-issues.html>

71. Дослідження основних недоліків базових станцій різних поколінь стільникового зв'язку / Р. С. Одарченко та ін. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2016. №3. С. 81-89.

72. 13. Одарченко Р.С., Харлай Л.О. Метод резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі з урахуванням основних характеристик мереж. *Технічні науки та технології*. 2018. №1(11). С. 89-96.

73. Одарченко Р.С., Абакумова А.О. Метод балансування навантаження в опорній мережі стільникового оператора. *Наукоємні технології*. 2016. №32 (4). С. 369-375.

74. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022: веб-сайт. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>

75. Вишнеvский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. WiMAX: Путь к 4G: Энциклопедия. Москва, 2009. 472 с.

76. Скрынников В.Г Проблемы планирования и обеспечения ЭМС сетей LTE. *Сети мобильной связи LTE: технологии и практика*: материалы семинара МСЭ для стран СНГ. 03-05 марта 2014, г. Москва

77. Бабков В.Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE: учебник. Санкт – Петербург, 2012. 66 с. URL: <https://docplayer.ru/56362470-Podhody-k-planirovaniyu-i-optimizacii-setey-lte-v-yu-babkov.html>

78. E. Amaldi E., Capone A., Malucelli F. Planning UMTS base station location: optimization models with power control and algorithms. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2:939-952, Sept. 2003.

79. C. Coletti, L. Hu, N. Huan, I. Z. Kovács, B. Vejlgaard, R. Irmer, N. Scully. Heterogeneous deployment to meet traffic demand in a realistic LTE urban scenario. *IEEE VTC-Fall '12*, Sept. 2012.
80. K. Majewski and M. Koonert. Conservative cell load approximation for radio networks with Shannon channels and its application to LTE network planning. *IEEE ANTS '10*, Dec. 2010.
81. I. Siomina and D. Yuan. Analysis of cell load coupling for LTE network planning and optimization. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 11:2287-2297, June 2012.
82. V. Erceg, K.V. S. Hari, M.S. Smith, D.S. Baum, K.P. Sheikh, C. Tappenden, J.M. Costa, C. Bushue, A. Sarajedini, R. Schwartz, D. Branlund, T. Kaitz, D. Trinkwon, "Channel Models for Fixed Wireless Applications," *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*. 2001.
83. Okumura Y. Field strength variability in VHF and UHF land mobile services. *Comm. Lab.*1968. Vol. 16. P. 825-873.
84. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *Transactions on Vehicular Technology*. 1981. Vol. VT-29. P. 317-325.
85. P. Bayvel , R. J. Gibbens, J. E. Midwinter, S. Lanning , D. Mitra , Q. Wang , and M. Wright. Optimal planning for optical transport networks 15 August 2000
86. M. Lee, J. Yu, Y. Kim, C. Kang, and J. Park. Design of Hierarchical Crossconnect WDM Networks Employing a Two-Stage Multiplexing Scheme of Waveband & Wavelength. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2002. P. 166-171.
87. W. Grover, "Mesh-Based Survivable Networks- Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking," Prentice Hall PTR, 2004.
88. Чеботарёва Д.В. Выбор оптимальной топологии транспортной сети мобильной связи с учетом противоречивых показателей качества. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2013. № 766. С. 124-131. URL: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/23421/1/21-124-131.pdf>

89. Bezruk V.M. Multicriterion optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling / V.M. Bezruk, A.N. Bukhanko, D.V. Chebotareva, V.V. Varich. *Open Book Telecommunications Networks*.2012. Chapter 11. P. 251.

90. Чеботарёва Д.В. Применение методов многокритериальной оптимизации при планировании сетей сотовой связи / Д.В. Чеботарёва, В.М. Безрук // *Радиоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2008. № 618. С. 117.

91. LTE mobile network optimization – a definitive guide White paper: веб-сайт. URL: https://www.mobilewirelesstesting.com/wp-content/uploads/2018/10/LTE_mobile_optimization-a_definitive_guide_wp_en_5216-2018-52_v0100.pdf

92. Iana Siomina, Di Yuan. Analysis of Cell Load Coupling for LTE Network Planning and Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2012. Vol. 11 , Issue: 6. P. 2287 - 2297

93. 3GPP TR 36.902 E-UTRA; Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions (Release 9). V9.3.1. March 2011

94. Климаш М.М., Мохаммад Хасан Алі Самур. Планування та оптимізація ширококутних систем мобільного зв'язку з урахуванням властивостей кодових послідовностей радіоінтерфейсів. *Моделювання та інформаційні технології: збірник наукових праць ІПМЕ НАН України*. 2009. Вип.54. С. 160-166.

95. Максимюк Т.А., Брич М.В., Климаш М.М, Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі: *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2015. №4(38) .С. 5-16.

96. Смелянский Р. Программно-конфигурируемые сети. *Открытые системы*. 2012. № 09. URL: www.osp.ru/os/2012/09/13039421/

97. С Орлов. SDN и другие. *Журнал сетевых решений/LAN*. 2014. № 06. URL: <https://www.osp.ru/lan/2014/06/13041880/>

98. Черняк Л. SDN – от замысла до рынка . *Открытые системы*. 2012. № 09. С. 18-24.
99. Семенов Ю.А. Сетевая технология OpenFlow (SDN). ИТЭФ-МФТИ. 2014. URL: <http://book.itep.ru/4/41/openflow.htm#22>
100. В. Коржов. Детские болезни SDN. *Открытые системы*. 2013. № 06. URL: <https://www.osp.ru/os/2014/06/13042312/>
101. Одарченко Р.С. Дослідження переваг та недоліків концепції SDN. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки* : зб. матеріалів доп. учасн. I Міжнар. наук.- практ. конф., 22 жовтня 2015 р.: Київ. 2015. С. 200.
102. Одарченко Р.С. Перспективні напрямки модернізації мережевої архітектури. *Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики*: зб. матеріалів доп. учасн. II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та молодих учених, 23-24 жовтня 2013 р. Київ: 2013. С. 56.
103. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Лобанчикова Н.М. Дослідження альтернативних напрямків модернізації архітектурних рішень сучасних комп'ютерних мереж. *Проблеми навігації та управління рухом*: зб. матеріалів доп. учасн. всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 18-20 листопада 2013 р. Київ. 2013. С. 109.
104. Одарченко Р.С. , Ткаліч О.П. Варіанти оптимізації мережі LTE. *Проблеми навігації та управління рухом розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: зб. матеріалів доп. учасн. всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів: 21-23 листопада 2014 р.: Київ. 2014. С. 156.
105. Одарченко Р.С. Дослідження структури мережі LTE та можливостей її оптимізації. *Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації*: зб. матеріалів доп. учасн. наук.- практ. конф., 25-28 лютого 2015 р. Київ. 2015. С. 80-82.
106. Одарченко Р.С. , Даков С. Ю. Основні тренди в розвитку безпроводових стільникових мереж. *Комп'ютерні системи і мережні*

технології: зб. матеріалів доп. учасн. VIII міжнародної науково-технічної конференції, 21-23 квітня 2015 р. Київ. 2015. С. 51-52.

107. Одарченко Р.С. Визначення проблемних місць реалізованих проектів мереж LTE. *ABIA-2015*: зб. матеріалів доп. учасн. XII міжнародної науково-технічної конференції, 28-29 квітня 2015 р. Київ. 2015. С. 15.33-15.38.

108. Одарченко Р.С. Зростання вимог до забезпечення інформаційної безпеки новітніх інформаційно-комунікаційних мереж. *ITSEC*: зб. матеріалів доп. учасн. V міжнародної науково-технічної конференції, 15-16 травня 2015 р. Київ. 2015. С. 103-105.

109. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Мачалін І.О. Удосконалення систем безпеки безпроводових мереж нових поколінь. *Стан та удосконалення безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем SITS-2015*: зб. матеріалів доп. учасн. VII Всеукраїнської науково-практичної конференції, 09-12 червня 2015 р. Коблево. 2015. С. 52-53.

110. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Устинов О.Ю., Колодинський Д.О. Оцінка адекватності моделей розповсюдження для їх використання під час визначення місцезнаходження абонентів. *Наукоємні технології*. 2015. Вип. 2 (26). С. 159-165.

111. Одарченко Р.С., Абакумова А.О. Формування вимог до транспортної мережі оператора стільникового зв'язку. *Проблеми навігації та управління рухом*: зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 23 – 25 листопада 2015 р.: Київ. 2015. С. 85.

112. Одарченко Р.С., Даков С. Ю. Расширение канала для LTE 4 поколения. *Проблеми навігації та управління рухом*: зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 23 – 25 листопада 2015 р.: Київ. 2015. С. 93.

113. Одарченко Р.С., Савченко А.І., Корольов В.І. Дослідження архітектури транспортної мережі LTE. *Проблеми навігації та управління рухом*: зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 23 – 25 листопада 2015 р. Київ. 2015. С. 96.

114. Одарченко Р.С. Основні вимоги до оптимізації транспортного сегменту стільникових мереж. *Проблеми навігації та управління рухом*: зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 23 – 25 листопада 2015 р. Київ. 2015. С. 96.

115. Одарченко Р.С., Корольов В.І., Климчук О.В. Дослідження технологій SDNі NFV. *Політ-2016.Сучасні проблеми науки*: зб. матеріалів доп. учасн. наук.-практ. конференції молодих учених і студентів, 7–9 квітня 2016 р. Київ. 2016. С. 116.

116. Одарченко Р.С. Терентьєва І.Є., Гнап Р.В., Михайленко К.О. Дослідження перспективних технологічних рішень для стільникових мереж сімейства стандартів 5G. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2016. Вип. 6. С.14-19.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ МЕРЕЖ ОПЕРАТОРІВ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Із розвитком стільникових мереж з'являються нові більш досконалі мережеві архітектури для передачі даних та керування мережевою інфраструктурою. Проте, залишається ряд невирішених завдань та проблемних місць, які необхідно вирішувати та усунути відповідно.

При цьому для операторів стільникового зв'язку в Україні однією з головних проблем створення та розвитку сучасних безпроводових систем зв'язку є більш ефективне планування, що дозволить з одного боку забезпечити необхідну якість обслуговування (цільову ефективність) та з іншого підвищити економічну ефективність використання мережевих ресурсів.

Тому метою даного розділу є удосконалення мережевої архітектури стільникових мереж в Україні. Для досягнення поставленої мети в даному розділі були вирішені наступні задачі: розроблено стратегію розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні; проведено удосконалення методів планування стільникової мережі; проведено уточнення класифікації послуг, які надаються операторами стільникового зв'язку; розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування та продуктивності мережі з метою її безперервної оптимізації; розроблене програмне забезпечення для планування мережі стільникового зв'язку та оцінки витрат, необхідних на її побудову.

2.1. Розробка стратегії розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні

Головним аргументом на користь якнайшвидшого впровадження стільникових мереж нового покоління (LTE-Advanced та 5G) є зростання обсягів даних, переданих по мережах мобільного зв'язку. Сьогодні основний внесок у цей обсяг вносить трафік Web [1]. Так, згідно з дослідженням, проведеним нещодавно в Північній Америці, в робочі години трафік, пов'язаний з переглядом Web-сайтів, займає 69% пропускну здатності каналу

передачі даних, тоді як, наприклад, на електронну пошту витрачається тільки 4% цієї смуги.

Лавиноподібне збільшення числа користувачів мережі Інтернет сприятиме подальшому зростанню обсягів даних, що пересилаються. Також збільшенню обсягів трафіку даних сприяє ще цілий ряд тенденцій.

Популярність компактних персональних комп'ютерів, а також смартфонів стрімко зростає; за статистикою, користувачі таких пристроїв генерують в 4-10 разів більше трафіку, ніж власники звичайних мобільних телефонів.

Тому українським операторам стільникового зв'язку слід вже зараз розробляти стратегії подальших дій по експлуатації та модернізації своїх мереж. При цьому основною задачею є вивільнення доступних для впровадження в Україні діапазонів. В світі, наприклад, найбільше використовуються наступні діапазони в окремих регіонах, як показано на рис. 2.1.

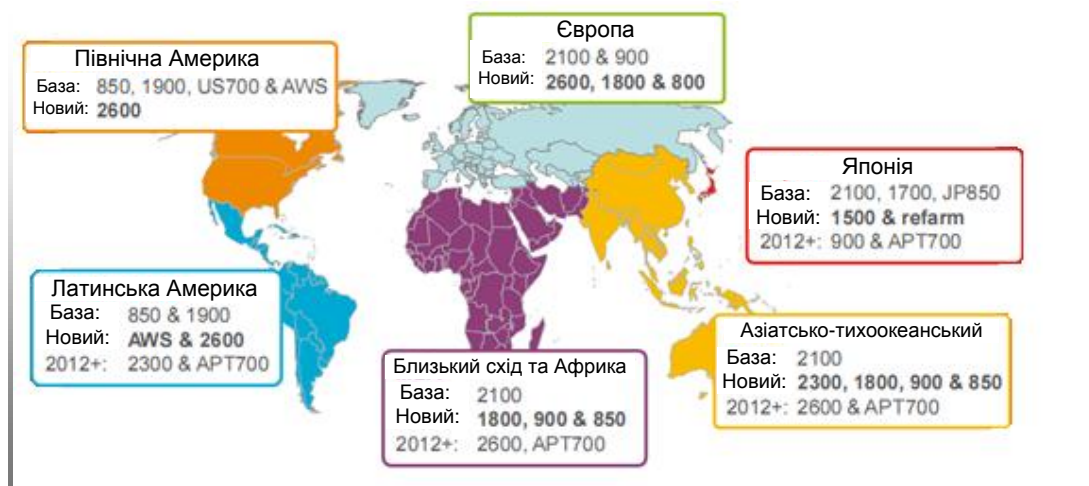


Рис. 2.1. Частотні діапазони для розгортання мереж LTE в світі

Як бачимо з рис. 3, найбільшого поширення в Європі набули стандарти 800, 900, 1800, 2100 та 2600 МГц. Крім того, останнім часом все більше смуг частот виділяється в околі частоти 2600 МГц.

Що стосується України, то підпунктом 10 пункту 8 Плану заходів щодо впровадження системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління [2] передбачено надання суб'єктам ринку телекомунікацій на конкурентних засадах

права на користування радіочастотним ресурсом України з використанням радіотехнології LTE на підставі висновків і пропозицій, отриманих за результатами виконання науково-дослідної роботи з питань дослідження стану розподілу радіочастотного ресурсу України та розробка пропозицій щодо впровадження системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління (LTE) в частотних діапазонах [2]: 694 - 790 МГц; 790 - 862 МГц; 862 - 880 МГц; 880 - 910 МГц; 925 - 955 МГц; 1427 - 1452 МГц; 1492 - 1518 МГц; 1710 - 1785 МГц; 1805 - 1880 МГц; 1900 - 1920 МГц; 1920 - 1980 МГц; 1980 - 2000 МГц; 2110 - 2170 МГц; 2300 - 2400 МГц; 2500 - 2690 МГц.

З огляду на вищесказане, Національна Комісія, в рамках своїх повноважень, прийняла відповідне рішення про видачу ліцензій на користування радіочастотним ресурсом у Київській області (смуга радіочастот 2540,0 ... 2556,0 МГц), в Харківській області (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2548,0 ... 2556,0; 2612,0 ... 2620,0 МГц), в Запорізькій області (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2564,0 ... 2580, 0; 2612,0 ... 2620,0 МГц), в Автономній Республіці Крим (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2548,0 ... 2556,0; 2612,0 ... 2620,0 МГц) і в м Севастополь (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2612, 0 ... 2620,0 МГц), в м Києві, Дніпропетровській, Донецькій, Харківській, Одеській, Запорізькій області (смуга радіочастот 2300,0 ... 2305,0; 2320,0 ... 2345,0 МГц) в Київській, Луганській, Львівській, Полтавській, Вінницькій, Житомирській, Сумській , Херсонській, Хмельницькій, Івано-Франківській, Волинській, Закарпатській, Кіровоградській, Рівненській, Тернопільській, Черкаській, Чернігівській, Чернівецькій області, Автономній Республіці Крим, Севастополі (смуга радіочастот 2300,0 ... 2345,0 МГц).

Це вже друге подібне рішення НКРЗІ, спрямоване на створення конкурентних умов отримання радіочастотного ресурсу України для впровадження нових технологій. 29 березня 2016 Комісією було прийнято рішення про видачу ліцензій на користування радіочастотним ресурсом у Київській області (смуга радіочастот 2540,0 ... 2556,0 МГц), в Харківській області (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2548, 0 ... 2556 0; 2612,0 ... 2620,0

МГц), в Запорізькій області (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2564,0 ... 2580,0; 2612,0 .. . 2620,0 МГц), в Автономній Республіці Крим (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2548,0 ... 2556,0; 2612,0 ... 2620,0 МГц) і в м Севастополь (смуга радіочастот 2532,0 ... 2540,0; 2612,0 ... 2620,0 МГц).

Кожен оператор стільникового зв'язку очікує від вкладання коштів у інвестиційні проекти впливу (ефекту), який відображається на величині прибутку підприємства від реалізації проекту, тому необхідно провести вибір оптимального проектного рішення з використанням критерію оптимальності Байеса-Лапласа (BL-критерію) [3], а також обґрунтування використання, як оціночну функцію, оптимальності – чистої приведенної вартості (чистого приведенного ефекту) за проектом, як інтегрального показника ефективності проектних рішень.

Прийняття інвестиційних рішень відбувається у ситуації невизначеності, формальна схема якої припускає наявність [4]:

1) множини $D(\vec{X})$ альтернативних рішень у розпорядженні оператора стільникового зв'язку (надалі – Оператор). Одне з них йому необхідно прийняти: $\vec{X}_i \in D(\vec{X}), i = 1, \dots, n$;

2) навколишнього середовища з безліччю взаємовиключних станів $Z_j \in D(\vec{Z}), j=1, \dots, m$, але в якому конкретно стані знаходиться (або буде знаходитись) навколишнє середовище, Оператору не відомо. Під зовнішніми станами для Оператора будемо мати на увазі можливість розгортання мережі в певному частотному діапазоні;

3) оціночної функції оптимальності E_{ij} , яка характеризує "виграш" Оператора під час вибору певного проектного рішення $\vec{X}_i \in D(\vec{x})$, якщо навколишнє середовище буде знаходитися (або знаходиться) у стані $Z_j \in D(\vec{Z})$ тобто конкретного значення оціночної функції оптимальності для проектного рішення X_i і стану навколишнього середовища Z_j . Ситуація прийняття інвестиційних рішень характеризується матрицею проектних рішень, яку представлено у табл. 2.1. Елементи матриці E_{ij} – оціночні функції

оптимальності, які є кількісною оцінкою критерію оптимальності для проектного рішення $X_i \in D(\vec{X})$ за умови, що навколишнє середовище знаходиться у стані $Z_j \in D(\vec{Z})$.

Оціночною функцією оптимальності, яка є кількісною оцінкою критерію оптимальності, є ефект від реалізації інвестиційного проекту.

Таблиця 2.1

Матриця проектних рішень

Альтернатива $D(\vec{X})$	Стан навколишнього середовища, який очікується в майбутньому $D(\vec{Z})$				
	\vec{Z}_1	...	\vec{Z}_j	...	\vec{Z}_m
\vec{X}_1	E_{11}	...	E_{1j}	...	E_{1m}
...
\vec{X}_i	E_{i1}	...	E_{ij}	...	E_{im}
...
\vec{X}_n	E_{n1}	...	E_{nj}	...	E_{nm}

За критерієм Байеса-Лапласа, оптимальним рішенням $X^* \in D(\vec{X})$ вважають таке, для якого математичне очікування результуючої оціночної функції оптимальності досягає найбільшого можливого значення [6]:

$$E_{BL} = \max_{\vec{X} \in D(\vec{X})} E_{jr} = \max_{\vec{X} \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m p_j \cdot E_{ij};$$

Множина оптимальних варіантів згідно з *BL*-критерієм визначають таким чином:

$$\vec{X}^* = \left\{ \vec{X}_i : \vec{X}_i \in D(\vec{X}) \wedge E_{BL} = \max_{\vec{X}_i \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m p_j \cdot E_{ij} \right\};$$

Коли апіорні імовірності щодо стану середовища – рівноімовірні, *BL*-критерій обертається у критерій Бернуллі-Лапласа:

$$E_{BL} = \frac{1}{m} \cdot \max_{\vec{X}_i \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m E_{ij}.$$

Тому для вибору оптимальних напрямків розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні необхідно сформувати множину можливих проектних рішень (3G, 4G, 5G), які будуть впроваджуватись $D(X)$ та множину станів навколишнього середовища, який очікується в майбутньому $D(Z)$, до якої віднесемо, як приклад, можливі частотні діапазони для розгортання різних технологій на доступному радіочастотному спектрі (табл. 2.2). також можна віднести попит населення, його платоспроможність, наявність конкуренції тощо. Слід відзначити, що значення чистого приведенного ефекту розраховано за допомогою наданих експертних оцінок та до таблиці 2.2 вводиться в умовних одиницях. Як критерій оптимальності для першого інформаційного стану можна використати: мінімум дисперсії оціночної функції або максимум ентропії математичного очікування оціночної функції [6].

Таблиця 2.2

Матрицю вибору проектного рішення для стільникового оператора

Альтернативне рішення $D(\vec{X})$ (технологія стільникових мереж)	Розподіл імовірностей						Результуюча оціночна функція
	$P_1(0)$	$P_2(0)$	$P_3(0,25)$	$P_4(0,25)$	$P_5(0,25)$	$P_6(0,25)$	
	Стан навколишнього середовища $D(\vec{Z})$ (частотний діапазон, МГц)						$E_{BL} = \sum_{j=1}^m P_j \cdot E_{ij}$
	\vec{Z}_1	\vec{Z}_2	\vec{Z}_3	\vec{Z}_4	\vec{Z}_5	\vec{Z}_6	
700	800	900	1800	2100	2600		
HSPA	0	0	2	0	1,8	0	0,95
LTE	3	3	0	3	0	2,7	1,425
5G	Не розглядалось через фактичну відсутність інформацію про реалізовані проекти						-
$E_{BL}=1,425$							

Таким чином, з огляду на вищесказане та враховуючи особливості радіочастотного спектру в Україні, можна запропонувати наступний сценарій розгортання мереж LTE (рис. 2.2) [7].

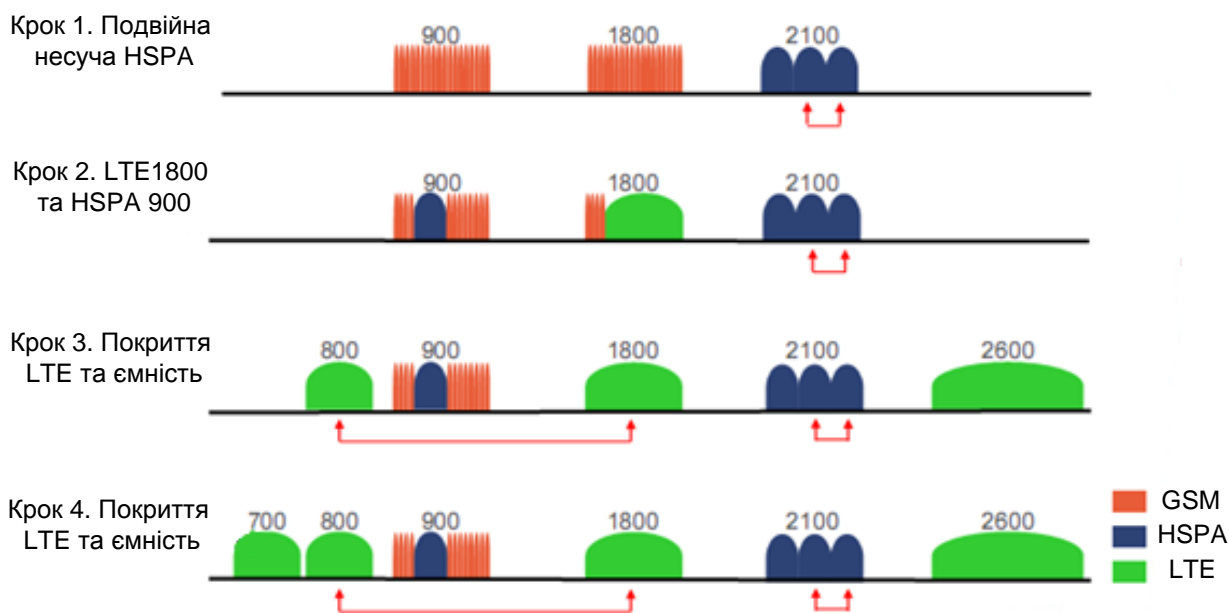


Рис. 2.2. Стратегія впровадження технології LTE на радіочастотному спектрі

Спочатку мають співіснувати технології GSM та HSPA, займаючи при цьому віддалені частини радіочастотного спектру (Крок 1), що матиме неабиякий вплив на відсутність взаємної інтерференції. Передбачається, що на даному етапі мережі GSM будуть обслуговувати переважно голосові виклики, а мережі HSPA – для передачі даних. Проте із плином часу більшість і мовних повідомлень буде мігрувати в мережі третього покоління. Тоді виникне можливість на часткове вивільнення діапазону 1800 МГц (Крок 2) та розгортання на цих частотах мереж LTE. Тоді вже будуть співіснувати мережі HSPA та LTE. В цьому випадку LTE не буде забезпечувати достатньої якості обслуговування абонентів та покриття.

На третьому кроці можна додати ще канали із двох діапазонів 800 та 2600 МГц, що дозволить забезпечити більше покриття території обслуговування та підвищення якості обслуговування за рахунок розвантаження використовуваних діапазонів.

На четвертому кроці додається ще один діапазон 700 МГц, що дозволить гнучко розподіляти всі доступні смуги частот між операторами стільникового

зв'язку при забезпеченні приблизно однакого рівню якості надання послуг абонентам.

Наразі існує необхідність у проведенні процедури частотного рефармінгу з метою більш ефективного розгортання нових радіотехнологій 4G та 5G. Рефармінг не повинен бути окремим процесом, він має виступати логічним наслідком забезпечення всіх вимог технологічної нейтральності.

В результаті рефармінгу спектр має перерозподілитися таким чином, щоб створити неперервні смуги частот для кожного оператора та передумови для переходу на нові широкосмугові технології. Необхідно провести в майбутньому справедливий рефармінг, який надасть можливість всім операторам конкурувати на рівних.

Таким чином, на базі проведених досліджень можна запропонувати наступні рекомендації по рефармінгу в Україні:

- Прийняття технологічної нейтральності в діапазонах частот 900/1800.

- Згода всіх учасників ринку з приводу проведення справедливого рефармінгу.

- Необхідність в розробці компенсаційних механізмів для операторів з боку держави для компенсації можливих втрат частини частотних діапазонів.

Для вивільнення частотного ресурсу запропоновано наступний алгоритм, приведений на рис. 2.3.

Аспекти ефективності використання радіочастотного спектру (РЧС):

- спектральна ефективність радіотехнології;

- кількість користувачів в одній смузі частот;

Правові аспекти:

- наявність відповідної нормативно-правової бази щодо розгортання нової радіотехнології;

- вдосконалення законодавства з регулювання інформаційних відносин;

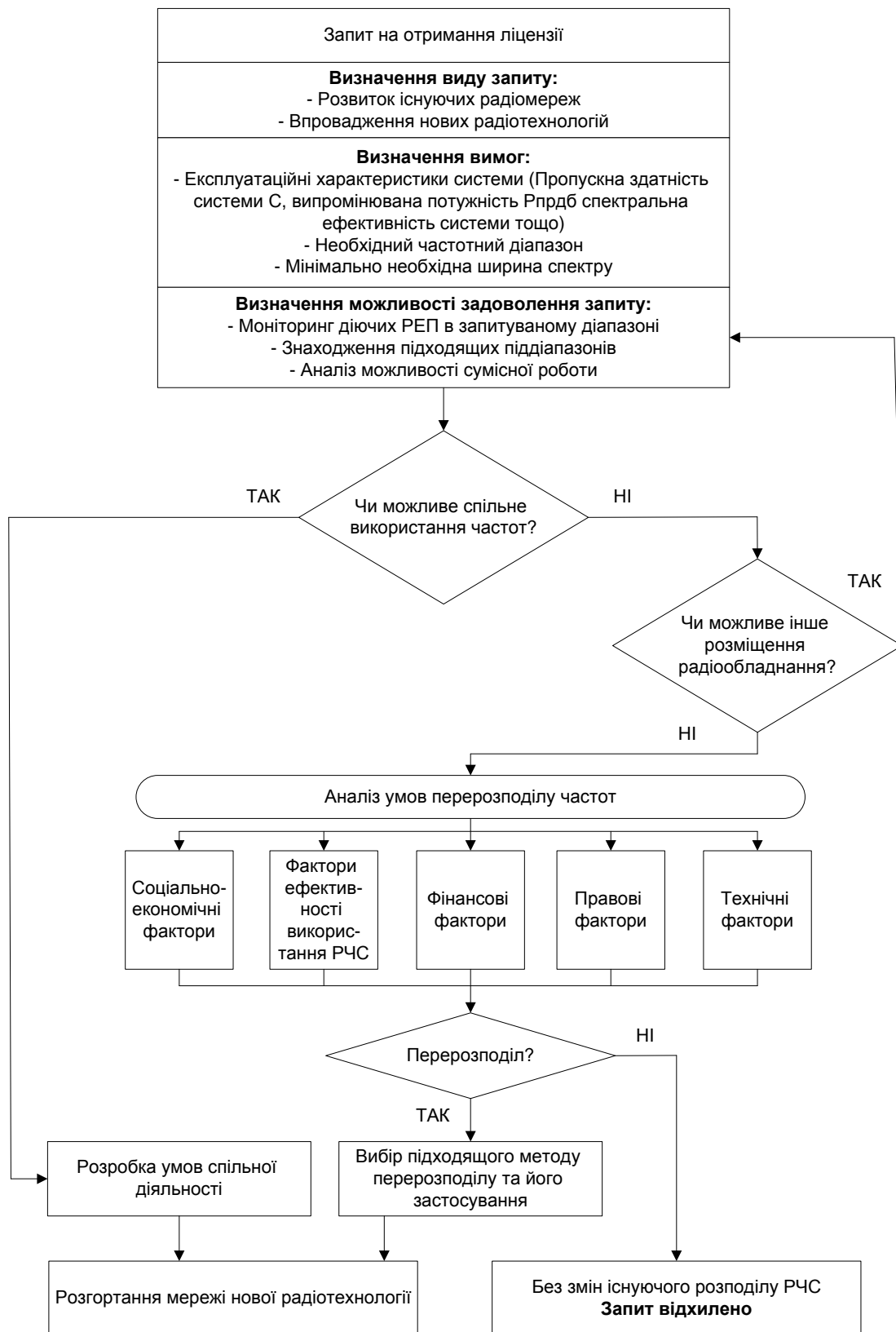


Рис. 2.3. Алгоритм вивільнення частотного ресурсу

- Закон України «Про радіочастотний ресурс України» [8];
- Закон України «Про зв'язок» [9];

- регуляторні вимоги;
- міжнародний розподіл частот (документи МСЕ);
- регіональні органи управління використанням спектру;
- національні процедури розподілу частот;
- процедури розподілу частот сусідніх адміністрацій;
- політика стандартизації;
- інфраструктура електрозв'язку;
- промислові користувачі;
- потреби користувачів;
- захист і громадська безпека;

Фінансові аспекти:

- оцінка потенційного доходу від впровадження радіотехнології;
- вплив розгортання радіотехнології на валовий внутрішній продукт (ВВП);
- підвищення ефективності та простоти ведення бізнесу;
- глобалізація;
- спільний європейський економічний розвиток;
- структура цін і тарифів для обладнання та послуг;
- потреби ринку і питання маркетингу;
- процедури і методи, використовувані провайдерами послуг;
- оплата спектра або спектральні аукціони;
- економічний вплив нових послуг і технологій;

Технічні аспекти:

- мобільність споживача;
- базові технології;
- розвиток мікроелектроніки;
- системи обробки сигналів;
- обробка даних в телекомунікація;
- компонентна база обладнання;
- джерела живлення, батареї;

- засоби зв'язку;
- кодування (джерела і каналу) і методи модуляції;
- методи каналного доступу і режими передачі;
- методи розширення спектра;
- методи рознесення, наприклад, часове, просторове і частотне;
- розробка або оптимізація антен;
- характеристики антен (діаграма спрямованості, коефіцієнт корисної дії (ККД), адаптивність антен);
- Зменшення випромінювання по бічних пелюстках;
- Простота розгортання нової радіотехнології;
- Можливість модернізації існуючих радіо технологій.

2.2. Удосконалений метод планування мережі LTE

В процесі створення і вдосконалення мережі стільникового зв'язку вирішуються два нерозривно пов'язані завдання: планування мережі (попереднє і детальне), оптимізація мережі (перепланування за результатами експлуатації). При вирішенні цих завдань виконуються аналогічні операції і обчислення. Крім того, процеси планування і оптимізації мереж різних стандартів також подібні [9, 10].

Планування мережі полягає в оцінці структури мережі, визначенні місць розміщення елементів радіопідмережі (мережеві елементи), визначенні висот і місць установки антен базових станцій мережі.

Оптимізація мережі передбачає аналіз даних верифікації (перевірки відповідності результатів планування параметрам існуючої мережі) і моніторингу, аналіз проблем, виявлених при експлуатації мережі (скарги клієнтів, даних про відмови та ремонтах мережі), вибір параметрів і критеріїв оптимізації, зміна (регулювання) параметрів, аналіз отриманих результатів на основі повторного моніторингу. Оптимізація відрізняється від планування тим, що вона:

- *по-перше*, виконується при розробленому частотно-територіальному покритті;

- *по-друге*, ґрунтується на результатах проведених драйв-тестів і технічного аудиту параметрів мережі в проблемних зонах обслуговування;

- *по-третьє*, її цілями є: підвищення ефективності використання мережевих і радіоресурсів, забезпечення рівномірного розподілу навантаження в мережі, поліпшення параметрів якості послуг.

Процес планування мережі стільникового зв'язку (рис 2.4) можна розбити на два етапи:

- попереднє планування;
- детальне планування.

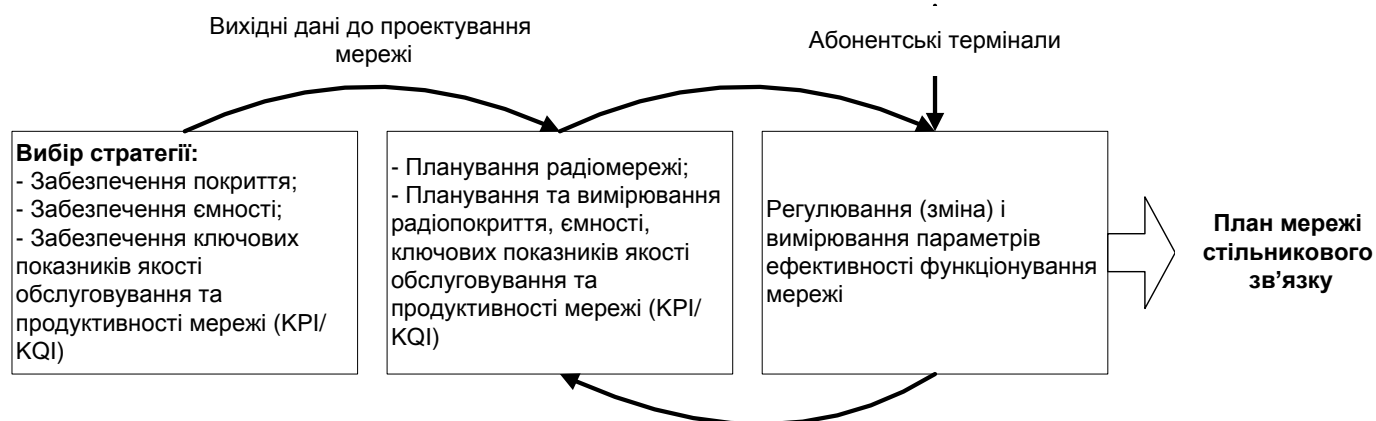


Рисунок 2.4. Основні етапи планування мережі стільникового зв'язку

2.2.1. Формування вибірки вхідних даних

Попереднє планування мережі пов'язано з вибором стратегії – вибором таких параметрів мережі, як:

- покриття;
- ємність;
- основні ключові параметри ефективності функціонування мережі – КРІ (ключових показників ефективності).

Під час планування та оптимізації стану мережі можна використовувати профіль якості обслуговування (табл. 2.3).

Профіль якості обслуговування

Тип профілю обслуговування	Показник якості надання послуг	Значення показника
N	Затримка	$t_{затр_N}$, мс
	Варіація затримки (джитер)	J_N , мс
	Швидкість передавання даних	C , біт/с
	Коефіцієнт втрати пакетів	$IPLR$
	Допустимий ризик ІБ	R

Дані із профілю обслуговування (табл. 2.3) використовуються в якості вхідних даних для планування мережі та потім її безперервної оптимізації.

Для визначення обґрунтованих потреб у модернізації обладнання зв'язку необхідно проводити аналіз інформаційних потоків в мережі.

Основними KPI для мережі LTE вважаються:

- відносне число успішних викликів КУВ;
- відносне число зривів з'єднань DCR (частота відхилення викликів);
- відносне число вдалих хендовера HSR;
- якість викликів (Call Quality);
- час встановлення виклику (Call Set-Up Time);
- та інші.

Крім того, на етапі попереднього планування оцінюють: компоновку мережі і передбачуване розміщення елементів мережі радіодоступу; кількість базових станцій, необхідне для обраного покриття. Як правило, на етапі попереднього планування використовують гіпотетичні дані про параметри і інфраструктуру мережі, які уточнюються на наступному етапі – етапі детального планування.

На етапі детального планування здійснюється [11]:

- планування конфігурації мережі (визначення типу і розміщення базових станцій, типу і розміщення антенних систем, розрахунок балансу потужностей в лініях «вгору» і «вниз»);

- планування топології мережі (розрахунок зон покриття і кордонів базових станцій з урахуванням даних про абонентський трафік).

Вибір обладнання для проектування мережі LTE. Традиційно замовник рішення формулює досить конкретне завдання на технічну реалізацію, і компанія-проектувальник пропонує йому найбільш ефективну систему, здатну забезпечити всі споживчі запити. У процесі вибору технічної реалізації також може відбуватися з'ясування потреб замовника шляхом проведення серії досить дорогих переговорів і узгодження всіх особливостей проектованої системи.

Відмінністю запропонованої методики від звичайних техніко-економічних розрахунків полягає в тому, що на практиці організація-замовник або простий абонент має свої інформаційні потоки, які залежать від технічних можливостей системи зв'язку, кількість і якість яких впливає на дохід компанії, або зручність користування кінцевими послугами. А у зв'язку з переведенням багатьох елементів сучасного ведення справ у віртуальний інформаційний простір ця залежність стає все більш значущою.

У зв'язку з цим, ключовим елементом методики є можливість вибору замовником рішення на основі аналізу власних потреб до якості обслуговування (цільової ефективності).

Методика вибору проектного рішення описується наступною послідовністю дій [12]:

Пошук і систематизація готових рішень для побудови мережі LTE (табл. 2.4):

Таблиця 2.4

Технічні характеристики готових рішень

Назва рішення/ Виробник	Стандарти	Рішення/ послуги	Вузли системи							
			eNB	MME	HSS	STP	PDN GW	MME/SGW	PCRF	SeGW

2. Вибір критеріїв $k=\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, за якими буде оцінюватися система (заносяться до табл. 2.5):

Таблиця 2.5

Матриця вибору оптимального готового технічного рішення

Назва готового рішення	Критерії оцінювання									Інтегральна оцінка
	k_1	k_2	k_n	

3. Для вибору оціночної шкали можна зробити багатокритерійний аналіз з ваговими коефіцієнтами або просто по наявності/відсутності певної необхідної характеристики і приймати рішення по ціні продукту. З ваговими коефіцієнтами критерій інтегральної оцінки буде мати вигляд:

$$k_{int} = \sum(k_n \cdot x_n),$$

де вектор $x=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – вектор важливих для оператора характеристик (наприклад, пропускна здатність, імовірність бітової помилки тощо).

4. Вибір оптимального готового рішення для побудови мережі LTE.

5. Пошук і систематизація рішень для побудови окремих вузлів мережі LTE. (табл. 2.6):

Таблиця 2.6

Вибір оптимального рішення для окремих вузлів мережі LTE

Назва моделі виробника для окремого вузла	Критерії оцінювання									Інтегральна оцінка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

6. Вибір критеріїв, за якими буде оцінюватися рішення для вузлів (вносяться до табл. 2.6).

7. Вибір оціночної шкали проводиться аналогічно п. 3 даної методики.

8. Вибір оптимальних рішень для окремих вузлів.

9. Перевірка сумісності окремих вузлів різних виробників (в разі невідповідності – заміна на менш оптимальне рішення).

10. Порівняльний аналіз вартостей готового рішення і на основі окремих вузлів та вибір кращого.

11. Розробка специфікації обладнання для побудови LTE мережі в рамках поставленого завдання і використання для подальших розрахунків.

2.2.2. Побудова початкового наближення мережі LTE

Завдання побудови початкового наближення мережі LTE можна сформулювати наступним чином: при заданій смузі частот потрібно визначити просторові параметри мережі (кількість базових станцій та розміри їх зон обслуговування) за умови, що пікові швидкості передачі даних (для певної групи абонентів) по лінії «вниз» і лінії «вгору» максимальні, а число базових станцій в складі мережі не перевищує допустимого значення [11].

Іншим варіантом може бути рішення задачі мінімізації числа базових станцій в складі мережі при заданих значеннях пікових швидкостей передачі даних по лінії «вниз» і лінії «вгору».

Складність завдань побудови початкового наближення мережі LTE не дозволяє знайти пряме рішення. При побудові початкового наближення мережі з ортогональним частотним поділом каналів будемо вважати, що:

- 1) щільність абонентів на території обслуговування мережі постійна, а розподіл абонентів по території рівномірний;
- 2) розміри всіх стільників мережі однакові;
- 3) морфоструктура місцевості однотипна (відкрита місцевість, приміський район або міська забудова);

Для підвищення точності побудови початкового наближення мережі всю територію обслуговування необхідно умовно розбити на фрагменти, де сформульовані вище допущення можна вважати прийнятними.

Виходячи з сформульованих вище обмежень, мережа має регулярну однорідну структуру, тобто вузли eNB вдалені між собою на однакову відстань, технічні характеристики і кількість приймально-передавачів, а також висоти підвісу антен, азимуту і кути нахилу однакові для всіх eNB.

Для побудови мережі початкового наближення потрібно досить великий набір вхідних даних, достовірність яких може істотно вплинути на адекватність прийнятого рішення. На цьому етапі проводиться оцінка бюджету втрат – показника, що характеризує допустимі втрати в радіолінії для заданого стандарту стільникового мобільного зв'язку.

Таким чином, вхідними даними до первинного планування мережі LTE будуть наступні параметри (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7

Вхідні дані для планування мережі

№ з./п.	Параметр	Одиниці виміру / варіанти
1	Площа території, на якій необхідно забезпечити покриття	м ²
2	Характер забудови	Місто Передмістя Сільська місцевість
3	Затримка в каналі	с
4	Імовірність бітової помилки	Не вище p_{bit}
6	Необхідна пропускна здатність на одного абонента	Мбіт/с
7	Кількість абонентів	

2.2.3. Методика оцінки бюджету втрат і зони покриття

Максимально допустимі втрати при поширенні в каналі рівні [12]:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fid} - IM - L_{slow} - L_{mem} - L_{\phi}, \quad (2.1)$$

де P_{TX} – потужність передавача;

G_{TX} – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

P_{RX} – чутливість приймача;

B_{BODY} – втрати в тілі абонента;

G_{RX} – коефіцієнт підсилення приймальної антени;

B_{fid} – втрати у фідері, IM – запас по інтерференції;

L_{slow} – запас на повільні завмирання, береться рівним 10.3 дБ.

L_{Φ} – втрати сигналу у фідерних лініях. При відсутності фідера (коли прийомопередавачі об'єднані з антеною у вигляді моноблока) необхідно враховувати конструктивні особливості пристрою з'єднання.

$L_{мет}$ – втрати, обумовлені поглинаннями в атмосферних газах, гідро метеорах, тумані тощо, дБ. $L_{мет}$ визначається наступною формулою [14]:

$$L_{мет} = L_{тум} + L_{гидромет} + L_{аз},$$

де $L_{тум}$ – втрати потужності радіосигналу в тумані, дБ;

$L_{гидромет}$ – втрати потужності радіосигналу під час опадів, дБ;

$L_{аз}$ – величина затухань радіосигналу в атмосферних газах.

Математичний апарат для розрахунку $L_{тум}$, $L_{гидромет}$ та $L_{аз}$ наступний [14].

Втрати у газах атмосфери $L_{Г}$, дБ, визначаються за формулою

$$L_{\bar{\lambda}} = (\gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O}) \cdot l,$$

де γ_{O_2} , γ_{H_2O} – погонні втрати (дБ/км) у кисні та водяних парах атмосфери при температурі повітря 15 °С та відносній вологості 100 % (абсолютна вологість становить 13,4 г/м³):

$$\gamma_{O_2} = \left(7,19 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5} \right) f^2 \cdot 10^{-3},$$

$$\gamma_{H_2O} = \left(0,078 + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3} \right) f^2 \cdot 13,4 \cdot 10^{-4}$$

де f - робоча частота, ГГц.

Додаткові втрати $L_{ДОД}$, які складаються з втрат у антенних обтікачах та від перепаду висот приймальної та передавальної антен можна прийняти рівними 1,5 дБ.

Запас по інтерференції IM (дБ) визначається наступним чином:

$$M = P_{np} - P_{nop} (10^{-3}).$$

Як показано в [15], чутливість приймача P_{RX} може бути представлена наступним чином:

$$P_{RX} = 10 \cdot \lg((E_b / N_0) \cdot k \cdot T \cdot R)$$

де (E_b / N_0) - відношення сигнал/шум в цифрових системах зв'язку – це відношення енергії сигналу на 1 біт до щільності потужності шумів на 1 герц;

R – швидкість передавання даних;

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/к – стала Больцмана,

T – температура в Кельвінах (абсолютна температура).

Таким чином вираз (2.1) можна представити у вигляді:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - 10 \cdot \lg((E_b / N_0) \cdot k \cdot T \cdot R) - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fid} - IM - L_{slow} - L_{мет} - L_{ф}$$

Для визначення співвідношень сигнал/шум, при яких не перевищується імовірність виникнення бітових помилок, проведемо моделювання для імовірності бітової помилки в обох підканалах для різних типів модуляції, яка використовується в обладнанні мереж LTE.

Імовірність бітової помилки BER_0 у гаусівському каналі дорівнює [16]

$$BER_0(\eta) = 0.5[1 - \Phi(\sqrt{\alpha\eta})],$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt,$$

де $\alpha=2$ и $\alpha=1$ для бінарної и квадратурної фазових модуляцій, відповідно.

Відношення сигнал/шум (ВСШ) в i -му власному підканалі $\eta_i = \beta_i \rho_i \lambda_i$.

Враховуючи нормування щільності імовірності i , вводячи параметр $\rho_i = \beta_i \alpha \rho_0$, отримаємо:

$$BER_i = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\infty f_i(\lambda) \Phi(\sqrt{\rho_i \lambda}) d\lambda$$

Враховуємо, що імовірність бітової помилки P_b для BPSK та QPSK визначається виразом [16]

$$P_b = Q(\sqrt{2\gamma_b}),$$

де $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_x^{\infty} \exp(-\frac{u^2}{2}) du$ – таблична функція, значення котрої надане у [16]; γ_b – відношення енергії біта E_b до спектральної щільності шуму N_0 .

Для гаусівського каналу і прийому за допомогою узгоджених фільтрів імовірність бітової помилки при модуляції M -QAM, де $M=2^k$ і k – парне, визначається наступним чином [16]

$$BER = \frac{2 \cdot (1-L^{-1})}{\log_2(L)} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(L)}{L^2 - 1} \cdot \frac{2 \cdot E_b}{N_0}} \right]$$

де $L = \sqrt{K}$ представляє кількість рівнів амплітуди в одному вимірі.

Проводячи необхідні обчислення в результаті для імовірності бітової помилки в сильному (першому) и слабкому (другому) власних каналах МІМО – системи з довільним числом M передавальних антен будемо мати наступні графічні залежності отримані під час моделювання (рис. 2.5 та рис. 2.6) [15].

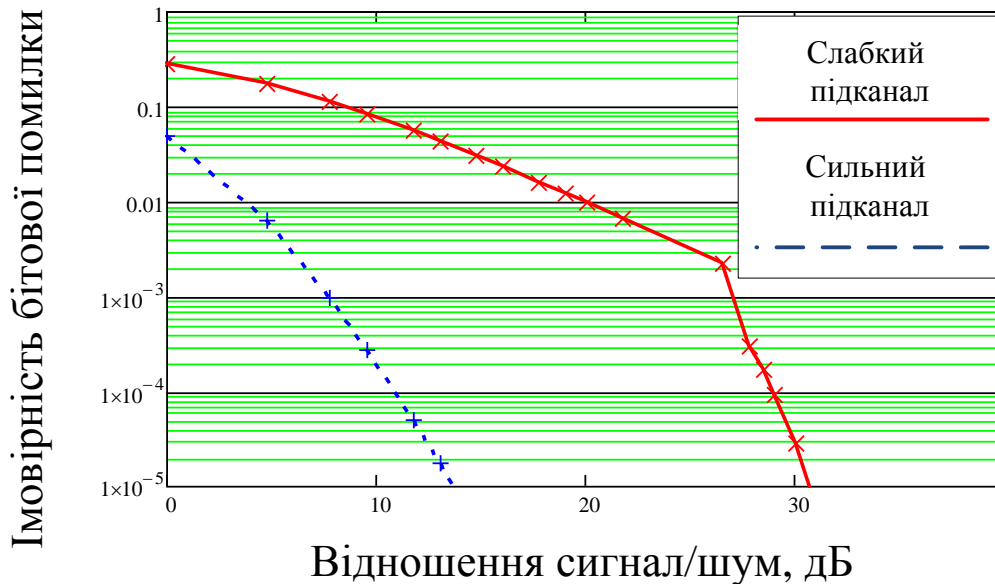
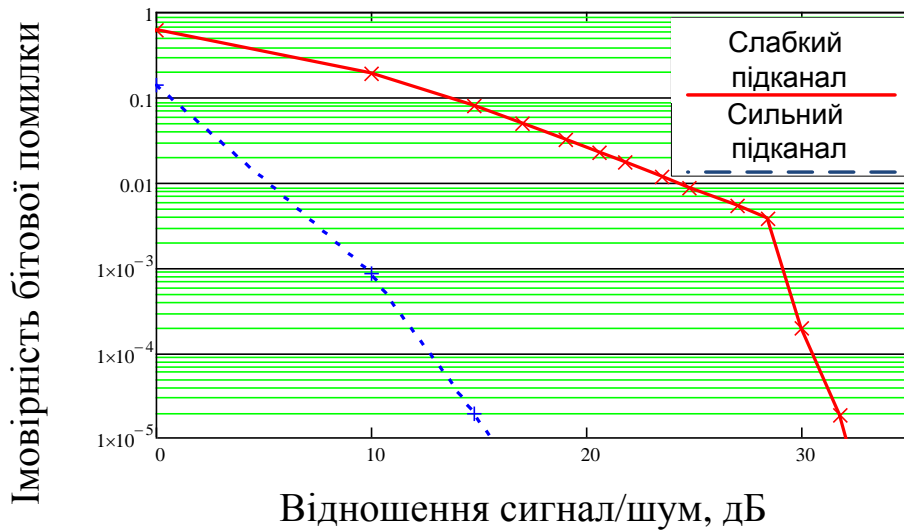
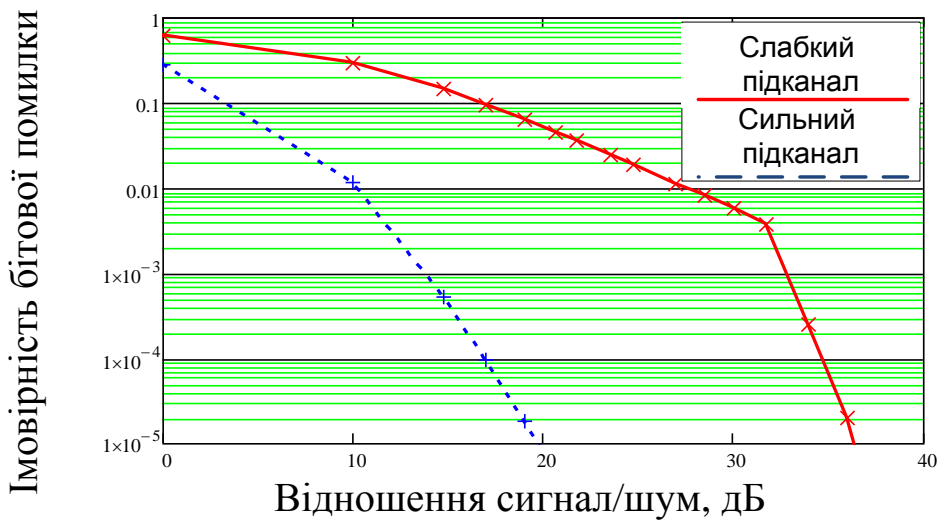


Рис. 2.5. Логарифмічна залежність імовірності бітової помилки від ВСШ в слабкому та сильному власних підканалах для модуляції QPSK



(а)



(б)

Рис. 2.6. Логарифмічна залежність імовірності бітової помилки від відношення сигнал/шум в слабкому та сильному власних підканалах для модуляції QAM-16 (а) та QAM-64 (б)

Для оцінки величини L на трасі розповсюдження радіохвиль, керуючись результатами проведених досліджень, можна розробити наступні рекомендації щодо використання моделей розповсюдження радіохвиль для різних діапазонів частот (табл. 2.8).

Рекомендації щодо використання емпіричних моделей розповсюдження
радіохвиль для різних діапазонів частот

Частотний діапазон	Технологія	Рекомендована модель розповсюдження радіохвиль
До 2 ГГц	5G, LTE, WiMAX, GSM, UMTS тощо	Модель Хата
2,3 ГГц; 2,5 ГГц; 2,6 ГГц	5G, LTE, WiMAX	Модель Хата Cost 231
3,5 ГГц	5G, LTE, WiMAX	SUI (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)
5 ГГц; 5,8 ГГц	5G, WiMAX	SUI (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)

Таким чином, можна виразити максимальну дальність зв'язку для різних частотних діапазонів, що використовуються в LTE. Наприклад, для моделі SUI (Stanford University Interim)[17] для діапазону вище 3,5 ГГц:

$$\lg(d/d_0) = (L - (A + X_f + X_h + s)) / 10\gamma, \text{ для } d > d_0,$$

де d – відстань від базової станції до приймаючої антени; $d_0=100$ м; X_f – корегуюча для частоти більшої за 2 ГГц; X_h – корегуюча для висоти приймаючої антени; s – корегуюча на затінення; γ – експонента втрат.

Параметр s знаходиться в межах між 8,2 та 10,6 дБ. Параметр A визначається:

$$A=20\lg(4\pi d_0/\lambda),$$

де λ – довжина хвилі; $\gamma=a-bh_b+(c/h_b)$, де h_b – це висота підйому антени базової станції (м), знаходиться в межах від 10 до 80 м.

Константи a , b та c залежать від типу місцевості, їх значення надані в таблиці 2.9.

Значення параметрів для різних типів місцевості в моделі SUI

Параметр моделі	Місцевість з пагорбами, високою щільністю перешкод	Приміська місцевість	Рівнинна місцевість з малою кількістю перешкод
a	4,6	4,0	3,6
b (1/м)	0,0075	0,0065	0,005
c (м)	12,6	17,1	20

$$X_f = 61 \lg(f/2000),$$

$$X_h = -10,8 \lg(h_r/2000),$$

$$X_h = -20 \lg(h_r/2000),$$

де f – це частота в МГц; h_r – висота приймаючої антени в метрах.

Якщо ж проводити оцінку всередині приміщень то доцільно скористатись моделями, представленими в [18].

Отже, результати розрахунку бюджету втрат в системах LTE показують, що збільшення смуги частот каналу призводить до зменшення допустимих втрат розповсюдження і для збереження енергетичного балансу між каналами «вгору» і «вниз» необхідно обмежувати кількість ресурсних блоків, що припадають на абонентську станцію.

Результати моделювання показують, що для міських умов:

1. Радіус зони покриття базових станцій LTE в діапазоні 2300 – 2400 МГц при робочій смузі 10, 15 і 20 МГц зменшується і становить, відповідно:

- При модуляції QPSK $1/3$ – 3.3, 2.8 і 2.4 км.
- При модуляції 16QAM $1/2$ – 1.8, 1.6 і 1.45 км
- При модуляції 64QAM $3/4$ – 1, 0.8 та 0.7 км

Відповідні модуляційно-кодувальні схеми вибираються, виходячи з необхідної якості послуги, зокрема, швидкості передавання даних та імовірності бітової помилки.

Оцінку залежності дальності зв'язку від частоти при різних видах забудови представлено на рис. 2.7.

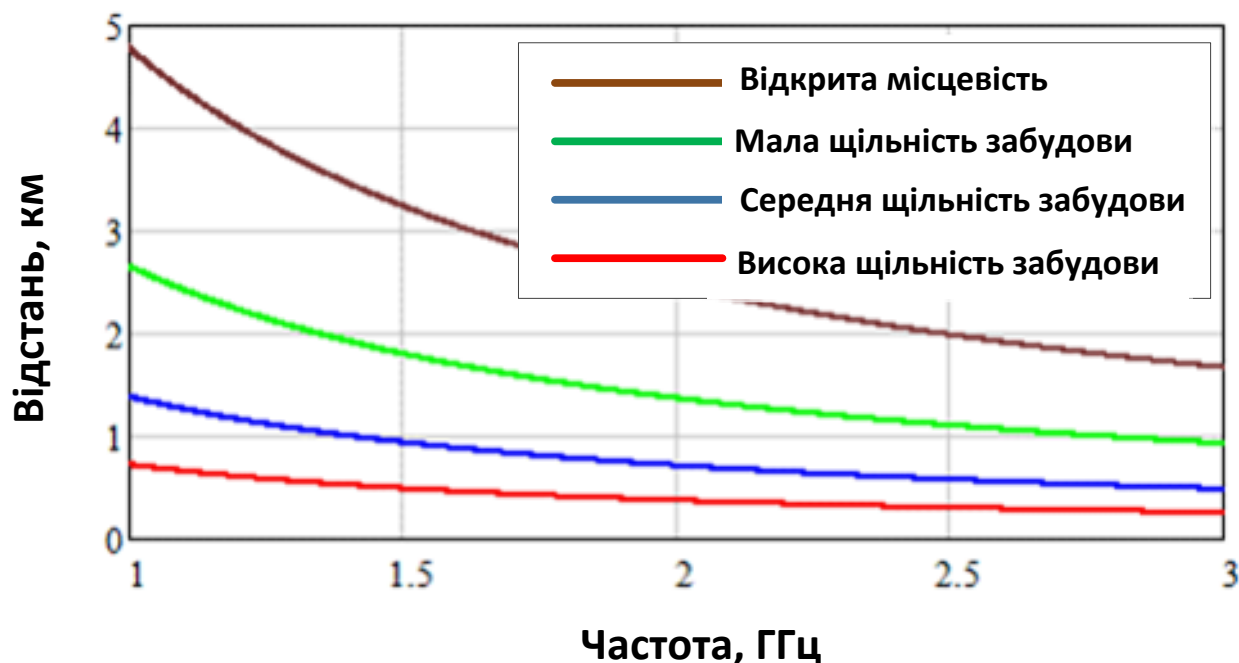


Рис.2.7. Залежність дальності зв'язку від частоти для різних типів забудови

2.2.4. Частотне планування мережі LTE

У процесі побудови мережі оптимізується розподіл просторово-технічних параметрів мережі (ресурсів мережі) при необхідній якості послуг зв'язку в час найбільшого навантаження. Вважаємо, що побудова мережі LTE доцільно за аналогією з мережами GSM здійснювати на основі стільникових кластерів). У мережі GSM під стільниковим (частотним) кластером розуміється група примикаючих один до одного стільників, в межах яких повторне використання одних і тих же частот неприпустимо через перевищення порогового рівня взаємних перешкод. У цьому випадку потрібно визначитися з типом частотного кластера і після його вибору, мережу стільникового зв'язку будують, повторюючи одні й ті ж частотні кластери в межах зони покриття мережі.

Критерієм при виборі частотного кластера є виконання вимог по допустимому відношенню сигнал/перешкода. В якості перешкод в даному випадку розглядаються перешкоди абонентським станціям, які створюють базові станції сусідніх кластерів, що працюють на повторюваних частотах.

Технологія LTE на відміну від технології GSM забезпечує кожній базовій станції мережі можливість вибірково виділяти смуги частот і потужність користувачам залежно від їх розташування в стільнику. При цьому можуть використовуватися різні моделі повторного використання смуг частот і, відповідно, з'являється можливість максимізувати пропускну здатність стільника при виконанні вимог до якості радіозв'язку в умовах обмежених ресурсів базової станції.

В мережі LTE можуть застосовуватись:

1. Повне повторне використання смуг частот каналів [19, 20], коли вся смуга частот повністю використовується кожною сотою незалежно від місця розташування абонентів в стільнику. Розподіл ресурсних блоків у цьому випадку здійснює планувальник базової станції. Розклад про розподіл ресурсів базова станція повідомляє абонентським станціям по спеціальному керуючому каналу. При цьому виникають проблеми з міжстільниковою інтерференцією, яка вимагає динамічного призначення смуг частот. В LTE динамічна координація для зменшення інтерференційної зв'язку між стільниками підтримується специфікованою 3GPP сигналізацією між базовими станціями (X2 інтерфейс) [21]. Застосування повного повторного використання смуг частот недоцільно з погляду абонентської ємності, так як зростає обсяг службової інформації, необхідної для динамічної диспетчеризації.

2. Жорстке повторне використання смуг частот каналів [22, 23], коли вся смуга частот розділена на фіксовану кількість смуг, які виділяються стільникам відповідно до деякої певної моделі повторного використання (за аналогією з GSM).

3. М'яке повторне використання смуг частот каналів, коли вся смуга частот розділена на фіксовану кількість смуг [23]. Для кожного стільника одна з цих

смуг виділена абонентам, що знаходяться на кордоні стільника, а інші смуги використовуються абонентами, що знаходяться поблизу базової станції.

4. Дрібне повторне використання смуг частот каналів, коли вся смуга частот розділена на фіксовану кількість смуг [22]. Загальна смуга частот використовується всіма базовими станціями для обслуговування абонентів, що знаходяться поблизу від базової станції. Решта смуги частот використовується абонентами, що знаходяться на межі зони обслуговування і виділяються стільникам відповідно до визначених моделей повторного використання.

Таким чином, частотне планування мережі є важливим етапом частотно-територіального планування мереж стільникового зв'язку з частотним (частотно-часовим) поділом каналів. Від частотного планування істотно залежить ступінь впливу внутрішньосистемних (інтерференційних) перешкод на якість зв'язку при спільному використанні обмеженого частотного ресурсу на обмеженій території всіма базовими станціями і абонентськими терміналами.

Для вирішення даного завдання використовується комплексна методика розподілу частот (рис. 2.8), що дозволяє вибирати методи оптимізації, що розрізняються як цільовою функцією з різними обмеженнями, так і послідовністю дій при пошуці екстремуму обраної функції з різною черговістю перевірки заданих обмежень [24]. При цьому методи відрізняються один від одного співвідношенням між гарантованою близькістю до найкращого результату (екстремуму обраної цільової функції).

На рис. 2.8 введено такі позначення [24]: N_f – кількість частот, які використовуються для планування; $N_{\text{дозв}}$ – кількість частот, дозволених та доступних для планування; ΔN_k – кількість каналів, яким не призначені частоти із-за недостатності частотного ресурсу; $S_{C/I}$ – втрати площі радіопокриття, що характеризуються часткою загальної площі покриття мережі, в якій рівень внутрішньосистемних перешкод по основному каналу вище допустимого рівня; $S_{C/I_{\text{дон}}}$ – допустимі втрати площі покриття; $Z_{C/I}$ – втрати навантаження, що

характеризуються часткою втраченого призначеного для користувача трафіку через високий рівень внутрішньосистемних перешкод по сусідньому каналу; $Z_{C/I_{oon}}$ – допустимі втрати навантаження.



Рис. 2.8. Удосконалена процедура частотного планування

Основу всіх завдань оптимального частотного планування становить завдання мінімізації числа приймачів, яким не вдається призначити частоти при дотриманні всіх заданих обмежень на повторне використання частот у вигляді матриць допустимого взаємного попарного впливу (сусідства) всіх секторів. Всі варіанти розподілу частот, що забезпечують $\Delta N_k = 0$, вважаються рівнозначними, тому при першому ж виконанні умови $\Delta N_k = 0$ розподіл частот припиняється, що істотно знижує витрати машинного часу.

Описана вище основна (пряма) задача планування частот вирішується шляхом послідовного пошуку першої підходящої частоти з заданого частотного ресурсу для кожного чергового приймача з урахуванням всіх заданих індивідуальних і загальних обмежень.

2.3. Побудова опорного сегменту

Опорний сегмент мережі LTE доцільно будувати за наступною послідовністю кроків [12]:

1. Розрахувати пропускну здатність каналів радіомережі за допомогою формули (2.2):

$$C_{1a\bar{b}} = \Delta F \cdot \beta, \quad (2.2)$$

де: $C_{1a\bar{b}}$ – пропускну здатність каналу, ΔF – ширина каналу, β – спектральна ефективність каналу,

2. Розрахувати початкове наближення пропускну здатності мережі LTE для кожного eNB, при цьому, виходячи з наступних умов (2.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{Tr.Мер} \geq \sum_{i=1}^{N_{a\bar{b}}} C_{1a\bar{b}i} = N_{a\bar{b}} \cdot C_{1a\bar{b}}, \\ C_{Ком} \geq \sum_{i=1}^{N_{ком}} C_{Tr.Мер.i}, \\ C_{Агр.} \geq \sum_{i=1}^{N_{ком}} C_{Комi}. \end{array} \right. \quad (2.3)$$

де: $C_{Tr.Мер}$ – пропускну здатність транспортної мережі; $C_{1a\bar{b}}$ – виділений канал на одного абонента; $C_{Ком}$ – пропускну здатність комутаторів; $C_{Агр.}$ – пропускну здатність інтелектуальної агрегації; $N_{a\bar{b}}$ – кількість абонентів; $N_{кан}$ – кількість каналів транспортної мережі; $N_{ком}$ – кількість комутаторів.

Обираючи обладнання транспортної мережі, потрібно керуватися особливостями технології LTE. Отже, щоб обладнання задовольняло критерію «ціна-якість», відповідало вимогам надійності, було достатньо ефективним, гнучким, компактним, багатофункціональним.

Для організації передавання даних за технологією LTE потрібно вибрати два типи транспортного обладнання:

- транспортне обладнання мережі радіодоступу;
- транспортне обладнання інтелектуальної агрегації.

Вартість всього обладнання розраховується за формулою (2.4):

$$P = P_{eNB} \cdot N_{eNB} + P_{ком} \cdot N_{ком} + P_{agr} \cdot N_{agr}, \quad (2.4)$$

де: P – загальна вартість обладнання, P_{eNB} – вартість однієї базової станції, N_{eNB} – кількість базових станцій, $P_{ком}$ – вартість одного комутатора, $N_{ком}$ – кількість комутаторів, P_{agr} – вартість однієї одиниці обладнання агрегації, N_{agr} – кількість одиниць обладнання агрегації.

2.4. Оптимізація основних параметрів мережі

Етапи процесу оптимізації мережі стільникового зв'язку представлені на рис. 2.10 [24].

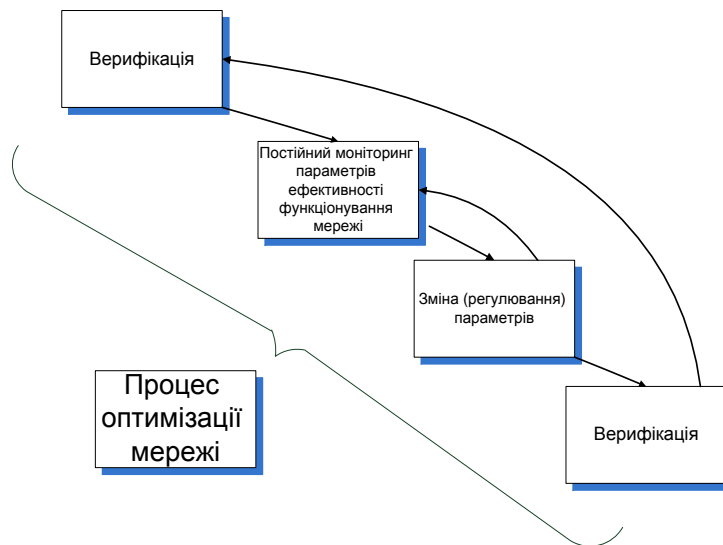


Рисунок 2.9. Етапи оптимізації мережі стільникового зв'язку

Верифікація передбачає контроль наступних основних даних [24]:

- координат розміщення базових станцій;
- зони обслуговування базових станцій;
- зони хендовера;
- списків частот для стільників;
- типів і параметрів приймачів базових станцій (потужність випромінювання, чутливість);
- типів і параметрів антен (коефіцієнта підсилення, діаграми спрямованості тощо);

- числа приймачів на антену;
- координат розміщення антен;
- параметрів розміщення антен (кутів нахилу, азимутів, висот установки, характеристик антенно-фідерного тракту).

Моніторинг мережі дозволяє оцінити радіопокриття і параметри ефективності функціонування мережі для перевірки їх відповідності результатам детального планування і виявлення проблемних ділянок.

Оптимізація передбачає різні види перепланування мережі на основі даних, отриманих в результаті верифікації та моніторингу. При цьому параметри мережі змінюються (оптимізуються) відповідно до обраних завданнями і критеріями. Наприклад, завданнями оптимізації можуть бути:

- перерозподіл трафіку мережі;
- підвищення ефективності використання радіочастотного спектру за рахунок частотно-територіального перепланування;
- мінімізація втрат покриття в зонах обслуговування через вплив шумових перешкод;
- збільшення зони обслуговування;
- поліпшення параметрів хендовера;
- підвищення якості окремих або сукупності послуг;
- використання суміщених стандартів в мережі і т.д.

Для проведення оптимізації пропонується використовувати метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж, який представлений нижче.

2.5. Метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж

Однією з актуальних і найбільш необхідних задач під час організації мереж мобільного зв'язку є задача оптимізації та доцільного використання ресурсів цієї мережі.

В даний час в Україні відсутня будь-яка документація яка регламентує показники ефективності функціонування стільникового зв'язку, контроль якості послуг проводиться в рамках внутрішнього аудиту. Підприємства зв'язку лише частково контролюються державними установами. Не існує певного конкретного алгоритму та методик контролю якості надання послуг. Таким чином, є доцільним розвиток та створення єдиної бази контрольованих показників якості, важливих як з точки зору користувачів так і підприємств. Важливо ввести певні норми на ці показники та допустимі значення, методи їх вимірювання, які будуть єдиними для всіх операторів мобільного зв'язку, і зможуть використовуватись контролюючими державними органами.

З метою підвищення якості надання послуг зв'язку в умовах конкуренції на ринку телекомунікаційних послуг необхідна розробка відповідних регламентуючих документів.

Для розробки системи контролю якості скористуємося методом, який заснований на використанні ключових показників ефективності та якості. Отже, насамперед необхідно визначити різницю між KQI та KPI.

Як ілюструє рис. 2.10, KPI, ключовий показник ефективності функціонування, безпосередньо відноситься до якості функціонування самої мережі, створення та використання цих показників направлено безпосередньо на мережу. KQI – ключовий показник якості функціонування мережі, функціонує на рівні сервісу. CEI (Customer Experience Management) відповідає за управління цими показниками.

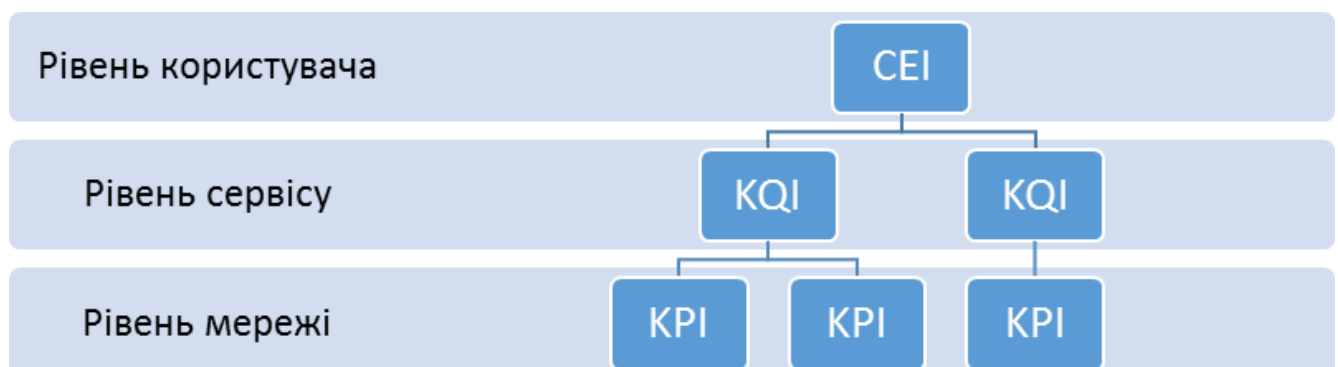
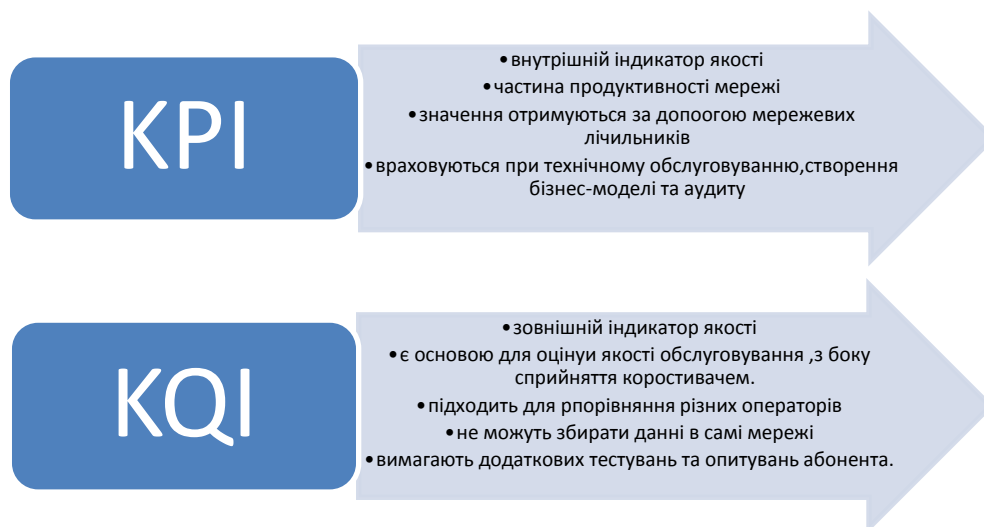


Рис. 2.10. Взаємозв'язок ключових показників надання послуг та продуктивності мережі

Основні відмінності KPI та KQI продемонстровані на рис. 2.12 [25].



2.11. Відмінності KPI та KQI

Тобто KQI формуються на основі KPI.

Показники якості KQI, не завжди є об'єктивними, оскільки базуються на особистих враженнях користувача мережі.

Для реалізації методики QoS яка базується на визначені індикаторів якості KQI/KPI необхідно спочатку визначити умови використання послуг. На кожному етапі перевіряється відповідне значення найбільш підходящих індикаторів для данної послуги.

Для ефективної роботи QoS доцільно визначати для задоволення скарг користувачів, щоб визначити, основні проблеми функціонування мережі, а потім їх усунути.

Умовно показники KPI розбивають на такі групи: доступу; інтеграції послуг; мобільності. KQI в свою чергу забезпечують оцінку: безпеки; легкість використання; гнучкість.

2.5.1. Класифікація послуг стільникового оператора

Наразі не існує чіткої класифікації додаткових послуг, які надаються в стільникових мережах. Порівнюючи різні покоління мобільних мереж [21, 26-28], можна зробити висновок про стрімкий розвиток ринку цих послуг, та велику кількість існуючих, тому, аби впорядкувати ці послуги, необхідно

удосконалити класифікацію таких послуг. Для успішної розробки та розвитку додаткових послуг необхідно мати чіткі уявлення про мету створення та умови реалізації. Основною ціллю створення таких послуг є комерційна вигода.

Оскільки конкуренція на ринку мобільного зв'язку є надзвичайно великою, то необхідно створити такі додаткові послуги, які зможуть виокремити мобільного оператора серед інших, та зацікавити користувачів.

Отже, умовно такі послуги можна розділити на дві групи, безкоштовні та платні VAS (Value added services) послуги які надаються мобільним оператором [29].

До безкоштовних послуг віднесемо послуги сервісу, тобто послуги які призначені для того аби задовольнити потенційного та існуючого абонента у взаєминах з компанією. Саме наявність та якість цих послуг в основному формує ставлення клієнта до компанії, її імідж.

Послуги сервісу включають в себе дві основні групи:

Управління – послуги управління призначені для того, аби абонент мав змогу змінювати та налаштовувати послуги які надаються МО, наприклад такі як:

- sim-меню;
- відновлення sim картки;
- зміна номеру телефону;
- відновлення номеру;
- призупинка обслуговування абонента;
- перевірка балансу;
- зміна тарифного плану;
- отримання автоматичних налаштувань.

Інформування – послуги інформування несуть ознайомчу функцію, до них відносяться такі послуги :

- call-центр;
- роздруківка рахунку за послуги;
- надання довідки про тарифи;

- USSD послуги;
- інформування про пропущений виклик.

Платні VAS включають в себе технологічні послуги.

Технологічні послуги – це послуги, які безпосередньо обмежені стандартом зв'язку і технологічною платформою яка використовується компанією-оператором.

Технологічні в свою чергу розподіляються на базові додаткові послуги – це набір додаткових послуг, що став однаковим практично для всіх компаній-операторів, і реалізований в більшості використовуваних ними стандартах стільникового зв'язку. Ці послуги підтримуються багатьма моделями сучасних стільникових телефонів. До базових послуг відносять чотири основних групи послуг:

Геолокаційні (LBS) – тип інформаційних та розважальних послуг, заснованих на визначенні поточного місця розташування мобільного телефону користувача. Можливості сучасних мобільних телефонів (зокрема, смартфонів) дозволяють відображати на екрані електронні карти досить високої якості, що дозволяє використовувати LBS для вирішення різних бізнес-задач, навігації та розваг. До них зокрема входять такі послуги:

- TOE;
- OTD;
- A-GPRS;
- GPS навігатор;
- визначення місцеположення за БС;
- визначення місцеположення за точкою доступу WI-FI;
- моніторинг рухомих об'єктів.
- відеотелефонія
- відеовиклик;
- відеоконференція;
- послуги управління викликами;
- переадресація;

- очікування;
- визначення номеру;
- заборона виклику;
- обмеження виклику;
- конференц зв'язок;
- перехід на новий поточний вхідний виклик;
- антивизначник номеру ;
- виклик за рахунок іншого абонента;
- утримання виклику;
- автоматичний виклик;
- запис розмови;
- Call back
- автовідповідач;
- Послуги міжнародного зв'язку діють за межами країни, та дають змогу здійснювати та приймати дзвінки в інші країни: роумінг; SMS за кордон.

Іншим важливим структурним елементом даної класифікації є контент-послуги. Ми відносимо до них – додаткові послуги мобільного зв'язку, які завантажують через (SMS, MMS, WAP тощо) технології, персоналізовану інформацію для особистого користування. В свою чергу контент послуги розподілимо на 3 великі групи: корпоративні послуги, персоналізацію , новини та розваги.

Група корпоративних додаткових послуг, призначена для малого бізнесу та корпорацій, тобто використовується групою осіб. Такі послуги включають особливі послуги притаманні лише для корпоративних клієнтів, вони не використовуються окремими абонентами. До таких послуг належать:

- корпоративні послуги;
- заміна гудка на корпоративний;
- короткий номер;
- прямий виклик з сайту;
- оренда КЗ;

- VoIP-телефонія;
- M2M-менеджер;
- Мобільна телеметрія;
- GSM/3G/4G-шлюз;
- прямий міський номер;
- підключення віртуальної мобільної АТС;
- отримання , передача факсимільних повідомлень.

Новини та розваги – це мульти-медійні послуги на базі спеціально розробленого програмно-апаратного комплексу, який дозволяє завантажити кольорові картинки (через GPRS, EDGE, 3G, 4G), музичні фрагменти, аудіо-, відеокліпи на телефони, SMS, Java-ігри:

- новини та розваги;
- USSD сервіс;
- Java ігри;
- booking;
- інфо підписки;
- mobile TV;
- курс валют.

Персоналізація – група додаткових послуг, які дають змогу персоналізувати телефон, та налаштувати його під кожного окремого користувача:

- голосова пошта;
- соціальні мережі;
- ring-back-tone;
- banking & payments.

Передача даних в мобільних мережах здійснюється за допомогою обміну повідомленнями, або за допомогою мобільного інтернету. В межах цих двох виокремлених підгруп надаються такі додаткові послуги:

- обмін повідомленнями;
- SMS;

- MMS;
- VOICE SMS;
- EMS;
- переадресація SMS;
- заборона вхідного SMS;
- SMS в роумінгу;
- SMS за кордон;
- SMS з e-mail;
- SMS розсилка;
- SMS Banking;
- Мобільний Інтернет;
- 3G;
- 2G;
- Мобільний інтернет в роумінгу;
- EV-DO;
- GPRS/EDGE.

Окремою групою послуг є захист в стільникових мережах, ця група слугує для безпечної передачі даних в мобільних мережах, та збереження конфіденційності. Зараз ці послуги не розвинені, однак в майбутньому вони будуть грати одну з провідних ролей.

Також виділено було групу фінансових послуг, які починають набирати популярності останнім часом. Оператори намагаються створювати сервіси, які би дозволяли акумулювати все життя, в тому числі й фінансове, у смартфоні.

Таким чином, було удосконалено узагальнену класифікацію послуг стільникового зв'язку (рис. 2.12).

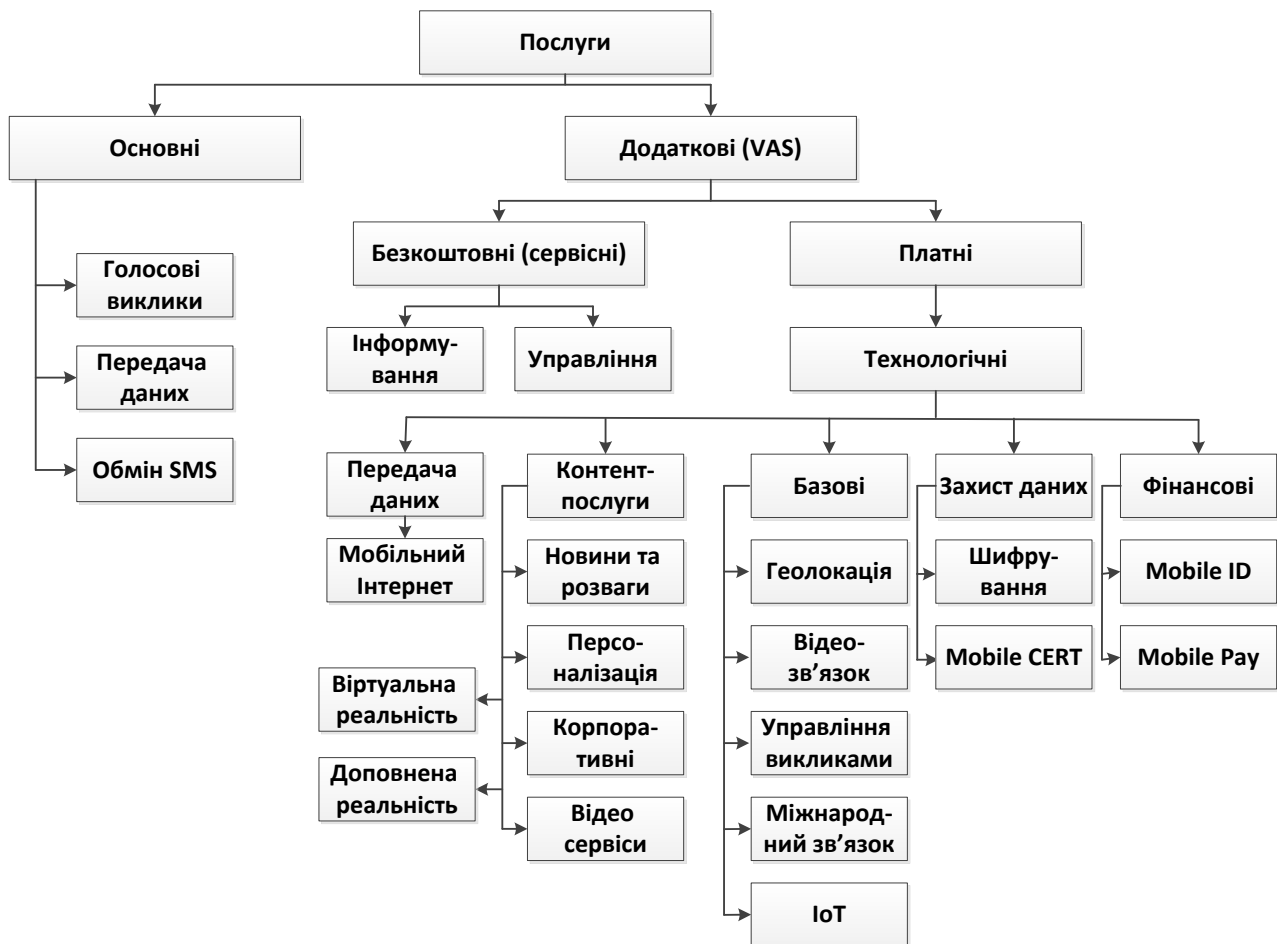


Рис. 2.12. Узагальнена класифікація послуг стільникового зв'язку

2.5.2. Вибір ключових показників якості надання послуг та продуктивності мережі

Як вже було відзначено, після розгортання мережі стільникового зв'язку необхідно проводити її безперервну оптимізацію шляхом оцінювання основних показників якості обслуговування та продуктивності мережі. Тому було розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування та продуктивності стільникових мереж.

Запропонований метод реалізується у чотири етапи:

Етап 1 – Визначення послуги. Для реалізації цього етапу введемо множину послуг аналіз яких потрібно провести S :

$$\{\bigcup_{i=1}^n S_i\} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (2.4)$$

де $S_i \subseteq S$, ($i = \overline{1, n}$), n – кількість послуг, а

$$S_i = \{\bigcup_{j=1}^{m_i} S_{ij}\} = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im_i}\}, \quad (2.5)$$

при цьому S_{ij} ($j = \overline{1, m_i}$) – підмножини елементів системи забезпечення якості обслуговування. Зважаючи на (2.5) запишемо вираз (2.4) наступним чином:

$$\begin{aligned} \{\bigcup_{i=1}^n S_i\} &= \{\bigcup_{i=1}^n \{\bigcup_{j=1}^{m_i} S_{ij}\}\} = \\ &= \{\{S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1m_1}\}, \{S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2m_2}\}, \dots, \{S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nm_n}\}\}, \quad (j = \overline{1, m_i}). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Підмножини показників KQI $S_{ij} \subseteq S_i$ визначимо як:

$$S_{ij} = \{\bigcup_{p=1}^{r_{ij}} S_{ijp}\} = \{S_{ij1}, S_{ij2}, \dots, S_{ijr_{ij}}\}, \quad (2.7)$$

де S_{ijp} ($p = \overline{1, r_{ij}}$) – показники KQI, що характеризують елемент системи забезпечення якості обслуговування S_{ij} ; r_{ij} – кількість таких показників.

Тоді вираз (2.4) з урахуванням (2.5) отримає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \{\bigcup_{i=1}^n S_i\} &= \{\bigcup_{i=1}^n \{\bigcup_{j=1}^{m_i} S_{ij}\}\} = \{\bigcup_{i=1}^n \{\bigcup_{j=1}^{m_i} \{\bigcup_{p=1}^{r_{ij}} S_{ijp}\}\}\} = \\ &= \{\{\{S_{111}, S_{112}, \dots, S_{11r_1}\}, \{S_{121}, S_{122}, \dots, S_{12r_2}\}, \dots, \{S_{1m_11}, S_{1m_12}, \dots, S_{1m_1r_{m_1}}\}\}, \\ &\{\{S_{211}, S_{212}, \dots, S_{21r_1}\}, \{S_{221}, S_{222}, \dots, S_{22r_2}\}, \dots, \{S_{2m_21}, S_{2m_22}, \dots, S_{2m_2r_{m_2}}\}\}, \\ &\dots, \\ &\{\{S_{n11}, S_{n12}, \dots, S_{n1r_1}\}, \{S_{n21}, S_{n22}, \dots, S_{n2r_2}\}, \dots, \{S_{nm_n1}, S_{nm_n2}, \dots, S_{nm_nr_{m_n}}\}\}\}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Етап 2 – Визначення показників KPI. На цьому етапі обираються ключові показники якості та ефективності S_{ijp} , використовуючи багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз. Для побудови багатофакторної регресійної моделі виділимо такі кроки:

Крок 1. Вибір всіх можливих факторів, які впливають на показник (або процес), що досліджується. Для кожного фактора потрібно визначити його числові характеристики. Якщо деякі фактори неможливо кількісно чи якісно визначити або для них недоступна статистика, то їх вилучають з подальшого розгляду.

Крок 2. Вибір вигляду регресійної чи багатофакторної моделі, тобто знаходження аналітичного виразу, котрий найкраще відображав би зв'язок факторних ознак з результативною, тобто вибір функції:

$$\hat{Y} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (2.9)$$

де \hat{Y} – результативна ознака-функція; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – факторні ознаки.

Крок 3. Перевірка адекватності отриманої моделі. Для цього необхідно обчислити:

– залишки моделі, тобто розбіжності між спостереженими та розрахунковими значеннями:

$$u_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - (a_0 + a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + \dots + a_n X_{ni}), \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2.10)$$

– відносну похибку залишків та її середнє значення:

$$\delta_i = \frac{u_i}{y_i} \cdot 100\%, \quad \delta = \frac{\sum_{i=1}^m \delta_i}{m}; \quad (2.11)$$

– середньоквадратичну помилку дисперсії збурень:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m u_i^2}{m - n - 1}}; \quad (2.12)$$

– коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m u_i^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}; \quad (2.13)$$

– коефіцієнт множинної кореляції R , який є основним показником щільності кореляційного зв'язку узагальненого показника з факторами:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2.14)$$

Всі значення коефіцієнта кореляції R належать інтервалу від -1 до 1. Знак коефіцієнта показує «напрямок» зв'язку: додатне значення свідчить про «прямий» зв'язок, від'ємне значення – про «зворотний» зв'язок, а значення «0»

– про відсутність лінійного кореляційного зв'язку. При $R=1$ або $R=-1$ маємо функціональний зв'язок між ознаками. Множинний коефіцієнт кореляції R є основною характеристикою тісноти взаємозв'язку між результативною ознакою та сукупністю факторних ознак.

Крок 4. Перевірка адекватності моделі. Перевірка здійснюється за допомогою статистики Фішера з n та $(m-n-1)$ ступенями вільності:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{m-n-1}{n}, \quad (2.15)$$

де n – кількість факторів, що увійшли в модель; m – загальна кількість спостережень; R – коефіцієнт множинної кореляції.

За таблицями Фішера знаходиться критичне значення $F_{кр}$ з n та $(m-n-1)$ ступенями вільності. Якщо $F > F_{кр}$, то це свідчить про адекватність побудованої моделі. Якщо модель не адекватна, то необхідно повернутися до етапу побудови моделі і, можливо, ввести додаткові фактори або перейти до нелінійної моделі.

Крок 5. Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Перевірка здійснюється за допомогою t -статистики, яка для параметрів багатofакторної регресії має вигляд:

$$t_i = \frac{a_i}{\sigma_{a_i}^2}, \quad (2.16)$$

де $\sigma_{a_i}^2$ – середньоквадратичне відхилення оцінки i -го параметра.

Якщо значення t_i перевищує критичне значення, яке знаходиться за таблицями t -критерію Стьюдента, то відповідний параметр є статистично значимим і має істотний вплив на узагальнюючий показник.

Крок 6. Обчислення коефіцієнта еластичності. Відмінності в одиницях вимірювання факторів усувають використанням часткових коефіцієнтів еластичності, що задаються співвідношенням:

$$\varepsilon_i = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_i} \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}}, \quad (2.17)$$

де x_i – середнє значення i -го параметра; y – середнє значення результативної ознаки.

Частковий коефіцієнт еластичності ε_i вказує, на скільки відсотків в середньому змінюється результативна ознака із зміною на 1% фактора x_i при фіксованому значенні інших параметрів.

Крок 7. Визначення довірчих інтервалів для параметрів регресії. Довірчий інтервал при рівні надійності $(1-\alpha)$ є інтервал з випадково визначеними межами, що з рівнем довіри $(1-\alpha)$ накриває істинне значення коефіцієнта рівняння регресії a_i і задається залежностями:

$$(a_i - t_{\alpha/2,k} \sigma_{ai}^2; a_i + t_{\alpha/2,k} \sigma_{ai}^2), \quad (2.18)$$

де $t_{\alpha/2,k}$ – статистика Стюдента з $k=m-n-1$ ступенями свободи і рівні значущості α ; σ_{ai}^2 – середньоквадратичне відхилення оцінки параметра a_i .

Отже, за допомогою наведеної розрахункової процедури багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу ми можемо оцінити вплив кожного із чинників, що утворюють модель процесу чи явища, на результативну ознаку і спрогнозувати поведінку об'єкта на майбутнє.

Етап 3 – Оцінка показників KPI. Для реалізації даного етапу використаємо підмножини показників KPI S_{ijp} (2.7) і відповідні формули для їх розрахунків (табл. 2.8) [30]. Також можна використовувати показники із додатку А.

Таблиця 2.8

Показники KPI мереж LTE

Групи KPI	KPI	Математичний апарат
Достіпність	Відсоток успішних RRC з'єднань	$RRCS_{SR_{service}} = \frac{RRCC_{service_усп.}}{RRCC_{service_спроб}} \times 100\%$

Групи КРІ	КРІ	Математичний апарат
	Відмова виклику (Call drop)	$VoIP_CDR = \frac{VoIPREBA_{норм}}{VoIPREBA_{всього}} \times 100\%$
	Відмова в обслуговуванні	$Serv_CDR = \frac{ERABA_{норм}}{ERABA_{всього}} \times 100\%$
Мобільність	Кількість успішних хендоверів всередині частотного діапазону	$IntraFreqHHOOut_SR = \frac{IntraFreqHHOOut_SR_{усп}}{IntraFreqHHOOut_SR_{спроб}} \times 100\%$
	Кількість успішних хендоверів поза частотним діапазоном	$InterFreqHHOOut_SR = \frac{InterFreqHHOOut_SR_{усп}}{InterFreqHHOOut_SR_{спроб}} \times 100\%$
	Кількість успішних хендоверів	$HOIn_SR = \frac{HOIn_{усп}}{HOIn_{спроб}} \times 100\%$
	Кількість успішних хендоверів до CDMA	$IRATO_L2C_SR = \frac{RATO_L2C_{усп}}{RATO_L2C_{спроб}} \times 100\%$
	Кількість успішних хендоверів до WCDMA	$IRATO_L2W_SR = \frac{RATO_L2W_{усп}}{RATO_L2W_{спроб}} \times 100\%$
	Кількість успішних хендоверів до GSM	$IRATO_L2G_SR = \frac{RATO_L2G_{усп}}{RATO_L2G_{спроб}} \times 100\%$
	Інтегрованість	Пропускна здатність DL
Пропускна здатність UL		$CellDLAveThp = \frac{CellDL_{об'єм_трафіку}}{CellDL_{час_передачі}} \times 100\%$
Максимальна пропускна здатність DL		$CellDLMaxThp = \frac{CellDLMaxThp_{об'єм_трафіку}}{1000(мс)} \times 100\%$

Групи КРІ	КРІ	Математичний апарат
	Максимальна пропускна здатність UL	$CellDLMaхThp = \frac{CellDLMaхThp_{об'єм_трафіку}}{1000(мс)} \times 100\%$
Утилізація	Утилізація блоків	$RB_UR_{DL} = \frac{RB_{викор_DL}}{RB_{дост_DL}} \times 100\%$ $RB_UR_{UL} = \frac{RB_{викор_UL}}{RB_{дост_UL}} \times 100\%$
Доступність	Відсоток недоступності радіомережі	$RAN_недост = \frac{\sum_{Кластер} Час_недост_стільника}{Кількість_стільників_в_кластері \cdot \{SP\} \cdot 60} \times 100\%$

Етап 4 – Порівняння показників з гранично допустимими значеннями.

На даному етапі отримані значення порівнюємо з гранично допустимими, можливими для забезпечення нормального функціонування мережі. Якщо ці значення перевищують допустимі, необхідно провести аналіз пристроїв які функціонують в стільниковій мережі та виявити причини невідповідності отриманих значень.

Для порівняння отриманих значень в результаті розрахунків з гранично допустимими введемо логічну функцію еквівалентності:

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > y, \\ 0, & \text{при } x \leq y. \end{cases} \quad (2.19)$$

В результаті буде визначено робота якого елементу або елементів системи забезпечення якості обслуговування не відповідає вимогам.

На базі розробленого методу було розроблено програмне забезпечення (Додаток В) та запропоновано структуру інтелектуальної оптимізації стану стільникової мережі в рамках проекту 5G-Xcast (рис. 2.13).

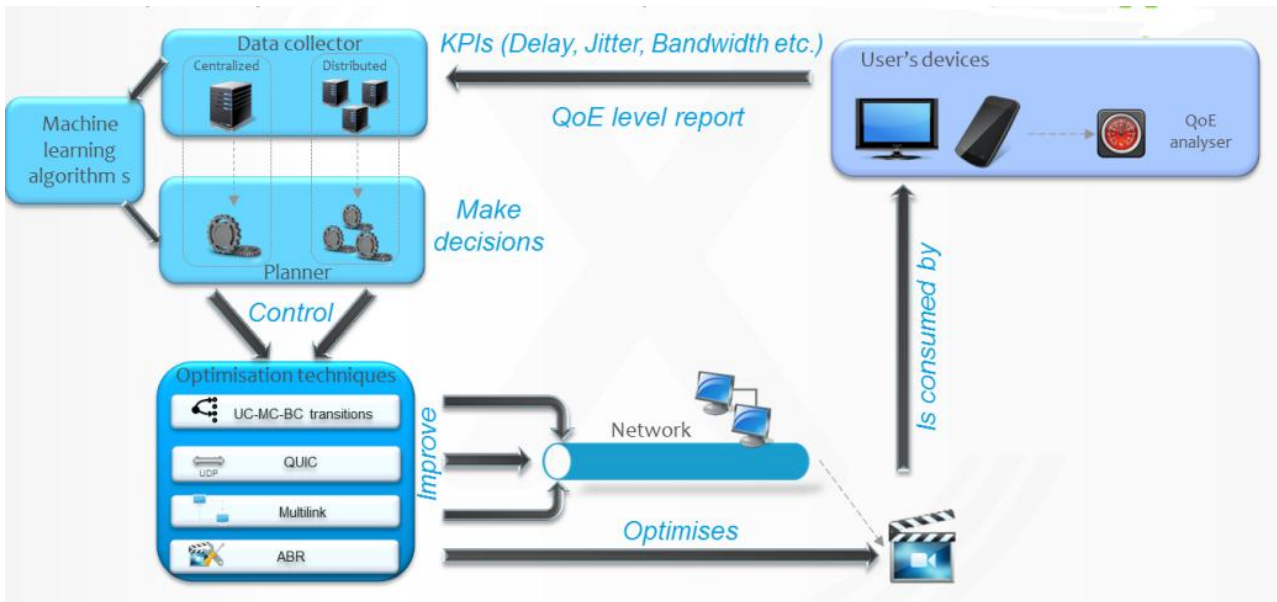


Рис. 2.13. Структура інтелектуальної оптимізації стану стільникової мережі

Дана структура, розроблена для мережі 5G, використання якої планується для доставки відеоконтенту, на прикладному рівні буде містити клієнтське програмне забезпечення, яке вбудоване до пристроїв користувачів. Воно буде періодично передавати дані щодо якості обслуговування та ключові показники цільової ефективності функціонування мережі (затримка, пропускна здатність, джитер тощо). Елемент «Data collector» збирає ці дані в ядрі мережі, потім ці великі об'єми аналізуються за допомогою алгоритмів «Machine learning» на предмет залежностей, тобто у відповідності до розробленого в даному розділі методу (рис. 2.14).

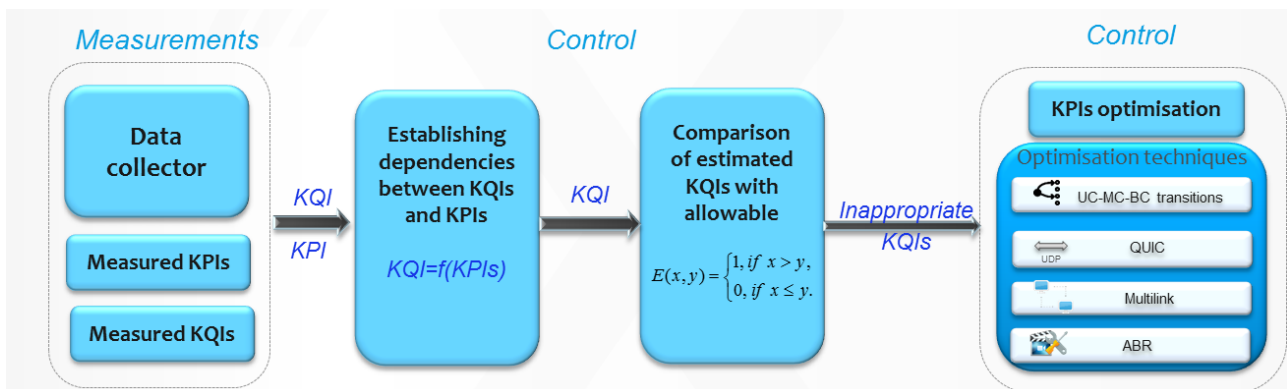


Рис. 2.14. Робота розробленого методу в проекті 5G-Xcast

Після роботи методу планувальник приймає рішення який ключовий показник якості обслуговування має бути покращений на вимогу абонента і в разі можливості буде застосовано один із оптимізаційних алгоритмів. Це наприклад може бути використання QUIC замість HTTP, Multilink, ABR, PTM тощо [31, 32]. Цей перелік оптимізаційних методів може бути розширеним.

2.6. Програмне забезпечення для побудови стільникової мережі та оцінки інвестиційних витрат

Програмне забезпечення повинно розраховувати максимально допустимі втрати в каналі та пропускну здатність мережі. Після того, як користувач заповнив необхідні для розрахунків поля, завантажується карта місцевості.

Одразу після запуску файлу «Оцінка ефективності мережі» перед користувачем з'являється головне вікно програми рис. 2.16. Умовно його можна поділити на дві колонки.

На рис. 2.16 зображено першу колонку, а саме розрахунок максимально допустимих витрат при поширенні в каналі. Розрахунок проводиться за формулою (2.1), після натиснення кнопки «Розрахувати».

На рис. 2.17 показано другу колонку – розрахунок пропускну здатності мережі. Розрахунок проводиться за формулами (2.2), (2.3) та (2.4), після натиснення кнопки «Розрахувати».

На рис. 2.18 та рис. 2.19 показано головне вікно з виведеним результатом.

Оцінка ефективності використання транспортної мережі LTE
Завантажити карту Допомога Про програму Вийти

Максимально допустимі втрати при поширенні в каналі	Пропускна здатність комплексів бездротової мережі
Потужність передатчика, дБВт: <input type="text"/>	Ширина каналу, МГц: <input type="text"/>
Коеф. посилення передавальної антени, дБ: <input type="text"/>	Спектральна ефективність каналу, Мбіт/с/МГц: <input type="text"/>
Чутливість приймача, дБВ: <input type="text"/>	Кількість абонентів, шт: <input type="text"/>
Втрати в тілі абонента, дБ: <input type="text"/>	Пропускна здатність базової станції, Мбіт/с: <input type="text"/>
Коеф. посилення приймальної антени, дБ: <input type="text"/>	Пропускна здатність комутатора, Мбіт/с: <input type="text"/>
Втрати у фідері, дБ: <input type="text"/>	Пропускна здатність агрегації, Мбіт/с: <input type="text"/>
Запас по інтерференції, дБ: <input type="text"/>	Вартість базової станції, грн: <input type="text"/> * 10 ⁶
Запас на повільні зчирнення, дБ: <input type="text"/>	Вартість комутатора, грн: <input type="text"/> * 10 ⁶
	Вартість обладнання агрегації, грн: <input type="text"/> * 10 ⁶

Розрахувати Розрахувати

Рис. 2.16. Головне вікно програми

Оцінка ефективності використання транспортної мережі LTE
 Завантажити карту Допомога Про програму Вихід

Максимально допустимі втрати при поширенні в каналі

Потужність передавача, дБВт:

Коеф. посилення передавальної антени, дБ:

Чутливість приймача, дБВ:

Втрати в тілі абонента, дБ:

Коеф. посилення приймальної антени, дБ:

Втрати у фідері, дБ:

Запас по інтерференції, дБ:

Запас на повільні завмирання, дБ:

Розрахувати

Рис. 2.17. Розрахунок максимально допустимих втрат при поширенні в каналі

Пропускна здатність комплексів бездротової мережі

Ширина каналу, МГц:

Спектральна ефективність каналу, Мбіт/с/МГц:

Кількість абонентів, шт:

Пропускна здатність базової станції, Мбіт/с:

Пропускна здатність комутатора, Мбіт/с:

Пропускна здатність агрегації, Мбіт/с:

Вартість базової станції, грн: * 10⁶

Вартість комутатора, грн: * 10⁶

Вартість обладнання агрегації, грн: * 10⁶

Розрахувати

Рис. 2.18. Розрахунок пропускної здатності мережі

Максимально допустимі втрати при поширенні в каналі

Потужність передавача, дБВт:

Коеф. посилення передавальної антени, дБ:

Чутливість приймача, дБВ:

Втрати в тілі абонента, дБ:

Коеф. посилення приймальної антени, дБ:

Втрати у фідері, дБ:

Запас по інтерференції, дБ:

Запас на повільні завмирання, дБ:

Максимально допустимі втрати при поширенні в каналі: 2,50 дБ

Розрахувати

Рис. 2.19. Результат розрахунку втрат

Пропускна здатність комплексів бездротової мережі

Ширина каналу, МГц:

Спектральна ефективність каналу, Мбіт/с/МГц:

Кількість абонентів, шт:

Пропускна здатність базової станції, Мбіт/с:

Пропускна здатність комутатора, Мбіт/с:

Пропускна здатність агрегації, Мбіт/с:

Вартість базової станції, грн: * 10⁶

Вартість комутатора, грн: * 10⁶

Вартість обладнання агрегації, грн: * 10⁶

Елементи мережі	Пропускна здатність одного, Мбіт/с	К-ть, шт.	Загальна пропускна здатність, Мбіт/с	Вартість одного, грн.	Загальна вартість, грн.
Абон. прилади	100,00	1000	100000,00	-	-
eNB	9800,00	10	100000,00	1,320 * 10 ⁶	1,320 * 10 ⁷
Комутація	16340,00	6	100000,00	1,980 * 10 ⁶	1,188 * 10 ⁷
Рівень агрегації	21200,00	4	100000,00	2,650 * 10 ⁶	1,060 * 10 ⁷

Розрахувати

Рисунок 2.20. Результат розрахунку пропускної здатності

На рис. 2.21 представлено головне меню програми. Воно має 4 кнопки:

- «Завантажити карту» – після натиснення завантажуються карта у браузері, що встановлений за замовчуванням;
- «Допомога» – після натиснення відкривається файл у форматі pdf, у якому описано як користуватися програмою;
- «Про програму» – відкривається вікно, у якому описано мету створення програми та розробника;
- «Вихід» – закривається вікно програми.

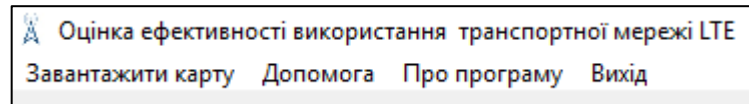


Рис. 2.21. Головне меню програми

Як було вище сказано, після натиснення на кнопку «Завантажити карту» завантажуються карта у браузері за замовченням. На рис. 2.22 показано вікно браузера з завантаженою картою.

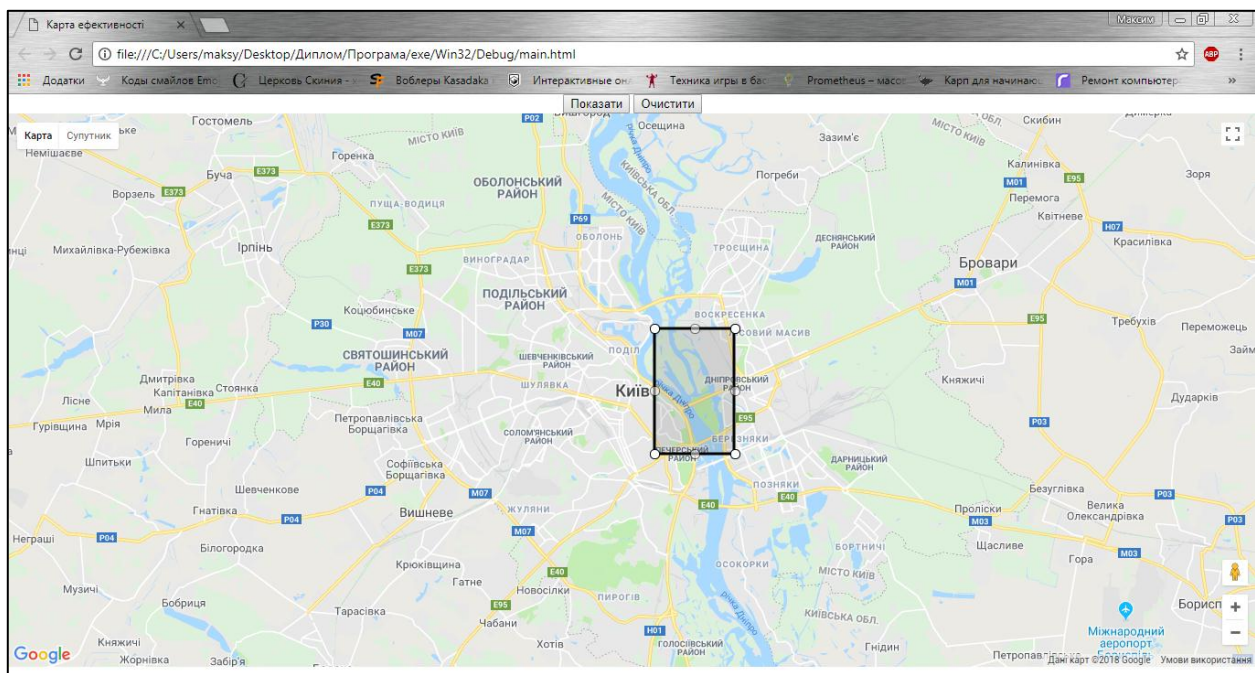


Рис. 2.22. Вікно браузера з картою

Вікно має дві кнопки: «Показати» та «Очистити». На рис. 2.23 та рис. 2.24 показано, що якщо натиснути «Показати», то виводиться повідомлення про необхідний радіус та прямокутник заповнюється базовими станціями. На рис.

2.25 показано, якщо натиснути «Очистити» – карта перезавантажитьсся зі збереженням поточного розташування та форми прямокутника.

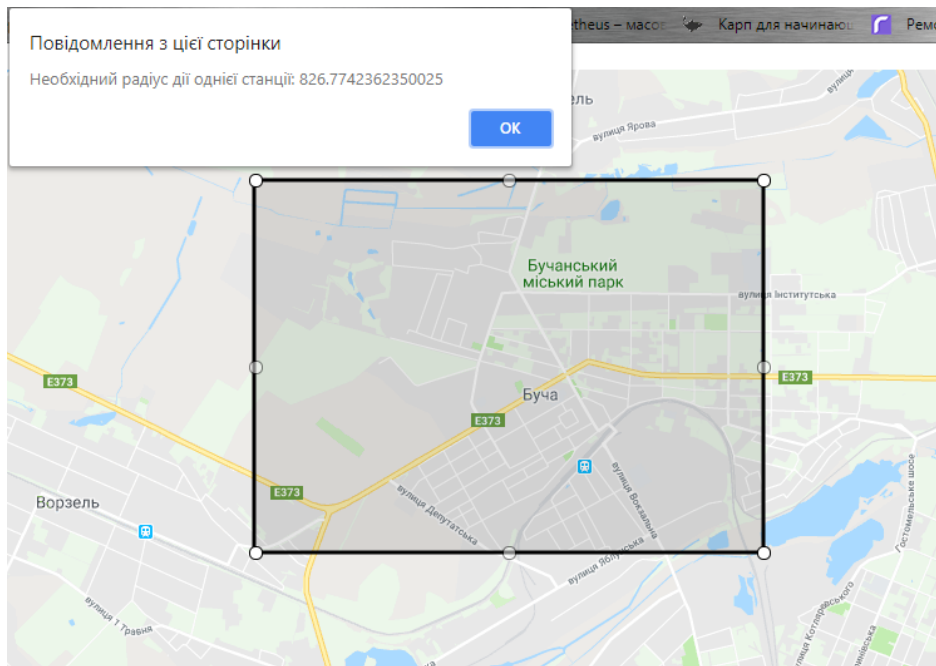


Рис. 2.23. Виведення повідомлення з необхідним радіусом

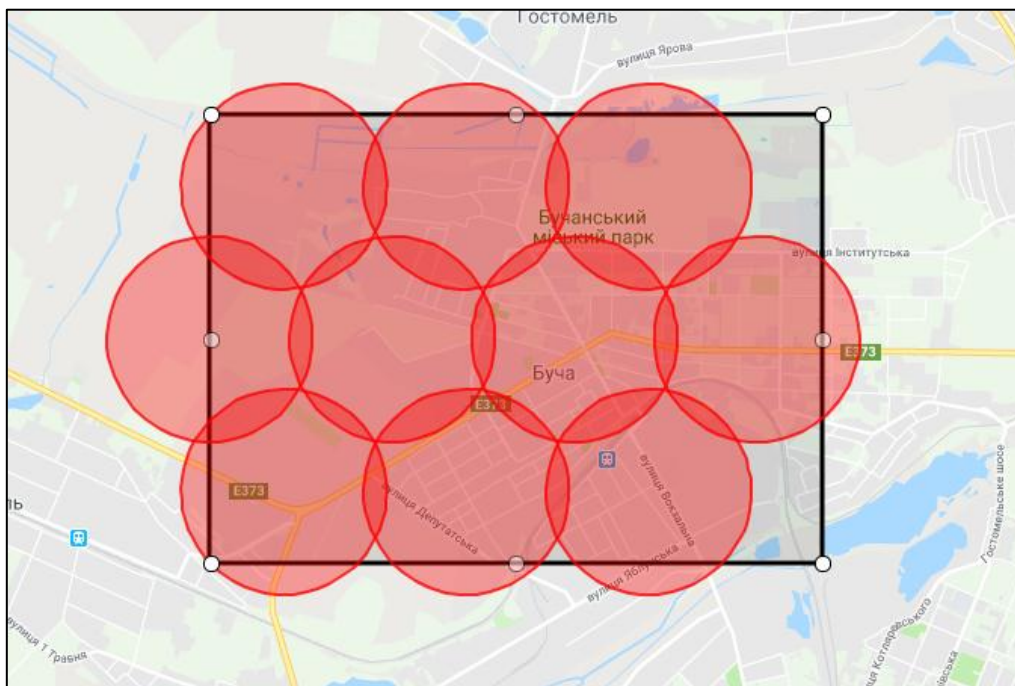


Рис. 2.24. Заповнення базовими станціями прямокутника



Рис. 2.25. Результат натиснення кнопки «Очистити»

Більш детальний порядок користування програмою представлено в [29]. Лістинг програмного забезпечення наведено в додатку Д.

Висновок до розділу 2

У розділі 2 розглянуто ряд аспектів, пов'язаних з удосконаленням стільникової мережі. Проведені дослідження дозволили зробити наступні висновки.

1. З огляду на стан та перспективи розвитку стільникових мереж, запропонований сценарій розгортання мереж LTE в Україні із урахуванням основних вимог до запровадження принципу технологічної нейтральності та проведення рефармінгу радіочастотного ресурсу. Наведені рекомендації, яких необхідно дотримуватись для забезпечення безперервного розвитку вітчизняних стільникових мереж із можливістю збереження прибутків основних компаній, представлених на ринку.

2. Обґрунтована необхідність використання сучасних технологічних рішень при розгортанні мереж 4G. Зокрема, всі нові мережі, які плануються і будуються в даний час, мають бути засновані на використанні концепції Single RAN, а існуючі мережі мають проходити планову модернізацію, яка завершиться протягом декількох років, також базуючись на вищезазначеній концепції.

3. В даному розділі було удосконалено метод планування мережі LTE за рахунок послідовного визначення стратегії розвитку оператора стільникового зв'язку, найбільш важливих показників якості обслуговування, виборі обладнання із множини доступних альтернатив, виборі послуг для абонентів, оцінці зон радіо покриття із врахуванням особливостей рельєфу та кліматичних умов, корегування розташування базових станцій, удосконаленій процедурі частотного планування, попередній оцінці капітальних витрат на побудову мережі. Розроблений метод надає змогу операторам стільникового зв'язку проводити більш точну оцінку зон радіо покриття, вибір ключових показників якості обслуговування, більш ефективно частотне планування та розрахунок капітальних витрат, що дозволяє оцінити доцільність побудови варіанту мережі стільникового зв'язку. На основі даного удосконаленого методу розроблено навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіо покриття базових станцій мережі LTE.

4. Було проведено уточнення класифікації ключових показників якості обслуговування абонентів та продуктивності мережі стільникового зв'язку, які необхідно використовувати під час оцінки ефективності та захищеності стільникових мереж, планування та їх безперервної оптимізації.

5. Вперше розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та продуктивності стільникових мереж, який полягає у послідовному визначенні множини оцінюваних послуг, виборі на основі кореляційно-регресійного аналізу статистичних даних якості обслуговування та рівня захисту оптимальних критеріїв оцінювання функціонування мережі (ефективність та захищеність), безпосередній їх оцінці

та порівнянні із допустимим рівнем. Розроблений метод дозволяє проводити оцінку найбільш важливих показників якості функціонування та захищеності мережі стільникового оператора з метою їх постійного контролю та оптимізації під час впровадження нових сервісів обслуговування абонентів.

6. На базі розробленого методу було запропоновано архітектури системи інтелектуальної оптимізації стану стільникової мережі в рамках проекту 5G-Xcast.

7. На основі запропонованих в даному розділі методів та моделей було розроблене програмне забезпечення для планування мережі стільникового зв'язку та оцінки вартості розгорнутої мережі. Дане програмне забезпечення полегшить роботу мобільних операторів і дасть можливість вирішувати проблеми в умовах відсутності кваліфікованих інженерів, які проходять навчання.

8. Основні результати, висвітлені в даному розділі, оприлюднені в працях [7, 9, 10, 12-15, 25, 29, 31, 32].

Список використаних джерел у другому розділі

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022: веб-сайт.
URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>

2. Про затвердження плану заходів щодо впровадження системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління: розпорядження Кабінету міністрів України від 11 листопада 2015 р. № 1232-р .

3. Критерій Байеса-Лапласа: веб-сайт. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9_%D0%91%D0%B0%D0%B9%D1%94%D1%81%D0%B0_%E2%80%94%D0%9B%D0%B0%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B0

4. Жихор О.Б., Коваль Р.А. Вибір оптимального проектного рішення у ситуації невизначеності. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.5. С. 178-182
5. Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / пер. с англ. под ред. И. Ф. Шахнова. – Москва, 1981. 560 с.
6. Гамидов Г.С. Основы инноватики и инновационной деятельности / Гамидов Г.С., Колосов В.Г., Османов Н.О. и др. – СПб : Изд-во "Политехника". 2000. – 323 с.
8. Закон України «Про радіочастотний ресурс України».2000. № 36. ст.298.
9. Одарченко Р.С., Харлай Л.А. Исследование эффективности сотовых сетей в Украине. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2017. №11-10(31). С.23-32
10. Одарченко Р. С., Дика Н. В. Дослідження архітектури мереж стільникового зв'язку в Україні та можливостей їх переходу до мереж LTE. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 291-298.
11. Бойко М. П. Системи стільникового зв'язку : конспект лекцій, ОНАЗ. Одеса. 2004. 76 с.
12. Одарченко Р.С., Мирутенко Л.В., Даков С.Ю. Удосконалений метод побудови опорного сегменту мережі LTE. *Наукоємні технології*. 2018. №1(37). С.18-26.
13. Одарченко Р.С. Удосконалений метод планування мережі LTE / Р.С. Одарченко, В.В. Бараннік// Наукоємні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія / [за ред. В. В. Баранніка, В. М. Безрука] – Х. : Видавництво «Стиль-видат», 2018. С. 293-302.
14. Odarchenko R., Al Hadidi, M., Al-Azzeh, J.S., Gnatyuk S., Abakumova A. Adaptive regulation of radiated power radio transmitting devices in modern cellular network depending on climatic conditions. *Contemporary Engineering Sciences*. 2016. Vol. 9, №10. P. 473-485.

15. Одарченко Р.С. Оцінка імовірності бітової помилки та пропускної здатності каналів антенних МІМО-систем. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. Вип. 2. С. 57-67.

16. Прокис Дж. Цифровая связь / Прокис Дж/ пер. с англ. Д. Д. Кловского. Москва, 2000. 800 с

17. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва, 1971. 1108 с.

17. Mobile.Broadband.-Including.WiMAX.and.LTE(Springer): веб-сайт. URL: <https://www.coursehero.com/file/p7ktlot/2481-Stanford-University-Interim-SUI-Channel-Models-SUI-considers-the-terrain/>

18. Рекомендация МСЭ-R P.1238-8 (07/2015). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц – 100 ГГц

19. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособ. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва, 2007. 432 с.

20. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. Москва, 2005. 296 с

21. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. Москва, 2010. 284с.

22. . Бабков В.Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE. Санкт-Петербург, СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича. 2012. С. 27-29. URL: <https://docplayer.ru/56362470-Podhody-k-planirovaniyu-i-optimizacii-setey-lte-v-yu-babkov.html>

23. Гайдамака Ю.В., Гудкова И. А., Медведева Е. Г. К анализу схем повторного использования частот в беспроводной сети OFDMA. *TComm*. 2012. №7. С. 55-59.

24. Планирование сетей мобильной связи: веб-сайт. URL: http://new.rpls.ru/wp-content/uploads/2017/03/book_chapter_GPRS_UMTS.pdf

25. Одарченко Р.С., Скульська О.Ю., Гнатюк В.О. Метод оцінки ключових по-казників захищеності в сучасних стільникових мережах. *Безпека інформації*. 2017. № 1(23). С. 19-26.

26. Специфікація GSM: веб-сайт. URL: https://www.tutorialspoint.com/gsm/gsm_specification.htm ;

27. CDMA2000 1X / 1XRTT: Веб-сайт. URL: <https://www.electronic-notes.com/articles/connectivity/cdmaone-cdma2000/cdma2000-1xrtt-basics-tutorial.php>

28. W-CDMA: веб-сайт. URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/104-w-cdma>;

29. Одарченко Р.С., Харлай Л.О., Абакумова А. О., Чмих П.А. Програмне забезпечення для оцінки ключових показників якості обслуговування зі сторони абонента стільникової мережі. *Проблеми інформатизації та управління* . 2017. №3(59). С. 56-61.

30. BaseStation KPI Reference-Network Performance Indicator: веб-сайт. URL: <https://forum.huawei.com/en/thread-76045-1-1.html>

31. Deliverable D5.2, 5G-PPP 5G-Xcast project. August 2018

32. Deliverable D5.3, 5G-PPP 5G-Xcast project. November 2018

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА

Для належної підтримки нових широкосмугових технологій радіодоступу в сучасних стільникових мережах повинна бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та забезпеченні якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку. Таким чином, з метою оптимізації вже існуючих та побудови нових мереж 4G/5G необхідно розробляти методи, які дозволять підвищити ефективність стільникових мереж зв'язку для того, щоб вони могли відповідати ряду критеріїв.

Тому метою даного розділу було розробка методів оптимізації мережі радіодоступу стільникових операторів. Цю задачу умовно було розділено на декілька підзадач, які заключались як в розробці методів оптимізації підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, так і методів розвантаження даної підсистеми в разі необхідності.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розробити математичну модель для опису підсистеми базових станцій, а потім на її основі запропонувати метод її оптимізації. Також було удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу базових станцій операторів стільникового зв'язку.

3.1. Модель підсистеми базових станцій мобільного оператора

Для оптимізації підсистеми базових станцій було розроблено нову модель [1].

Кількість необхідних базових станцій для покриття всієї необхідної території обслуговування можна визначити за наступною формулою:

$$N_{BC} = \frac{S_{обсл}}{S_{ст}},$$

де $S_{обсл}$ - загальна площа обслуговування абонентів;

Площа яку обслуговується однією БС в стільнику визначається за формулою:

$$S_{ст} = \pi \cdot d_{\max}^2,$$

d_{\max} – це максимальний радіус стільника, який є функцією від багатьох змінних:

$$d_{\max} = f(P_{BC}, G_{прд}, G_{прм}, B_{аб}, B_{фід}, IM, L_{мет}, L_{розп}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}).$$

Відповідно і кількість необхідних базових станцій являється функцією багатьох змінних, яку з метою зменшення витрат оператора стільникового зв'язку необхідно мінімізувати:

$$N_{ст} = f(P_{BC}, G_{прд}, G_{прм}, B_{аб}, B_{фід}, IM, L_{мет}, L_{розп}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}) \rightarrow \min.$$

Враховуючи те, що деякі змінні параметри на практиці є чітко визначеними (технічні характеристики систем), то запишемо задачу параметричної оптимізації в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\max} = f(P_{BC}, G_{прд}, G_{прм}, B_{аб}, B_{фід}, IM, L_{мет}, L_{розп}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}, h_{BC}, h_{МС}) \rightarrow \max, \\ 0 < P_{BC} \leq P_{BC.\max}, \\ R_{аб.\min} < R_{аб} \leq R_{аб.\max}, \\ 0 \leq P_{bit} \leq P_{bit.\max}, \\ h_{BC.\min} \leq h_{BC} \leq h_{BC.\max}, \\ Price \leq Price_{дон}. \end{array} \right.$$

Вартість встановлення базових станцій включає вартість БС $Price_{BC}$, вартість оренди площі для встановлення БС $Price_{ор.пл}$, вартість встановлення БС $Price_{вст.БС}$ вартість підняття антени БС $Price_{вст.ант}$, вартість антенно-фідерного тракту для підключення БС до антени $Price_{афт}$, вартість антени $Price_{ант}$:

$$Price = Price_{BC} + Price_{ор.пл} + Price_{вст.БС} + Price_{афт} + Price_{ант} + Price_{вст.ант}.$$

Вартість БС відрізняється для кожного виробника обладнання і пропорційна випромінюваній потужності передавача $Price_{BC} = P_{прд} \cdot Price_{дБ.прд}$, де $Price_{дБ.прд}$ – вартість 1 дБ потужності БС. Вартість антенно-фідерного тракту

$Price_{афт} = Price_{м.афт} \cdot l_{афт}$, де $l_{афт}$ – довжина антенно-фідерного тракту, вартість

встановлення антени на висоті h_{BC} $Price_{вст. ант} = h_{BC} \cdot Price_{м.вст. ант}$, де $Price_{м.вст. ант}$ – вартість встановлення одного метру антени БС. $Price_{ор.пл}$ визначається орендодавцем, $Price_{вст. БС}$ визначається підрядником, який буде виконувати ці роботи, $Price_{ант}$ визначено виробником обладнання.

Загальна пропускна здатність однієї БС може бути визначена за допомогою наступного виразу:

$$C_{BC} = W \cdot \beta,$$

де β – спектральна ефективність БС;

W – загальна виділена смуга часто в стільнику для однієї БС;

Необхідна пропускна здатність для обслуговування всіх абонентів в стільнику може бути визначена наступним чином:

$$R_{заг} = R_{аб} \cdot N_{акт. аб},$$

де $N_{акт. аб}$ - кількість активних абонентів, яких необхідно обслуговувати.

Вона повинна бути меншою загальної пропускної здатності БС:

$$R_{заг} \leq C_{BC}.$$

Кількість активних абонентів залежить від площі обслуговування в межах міської забудови $S_{заб}$, на вулиці $S_{вул}$, щільностей абонентів відповідно в будівлях та на вулиці σ та коефіцієнтів їх активності ν :

$$N_{акт. аб} = \nu_{б\text{уд}} \cdot \sigma_{б\text{уд}} \cdot S_{заб} \cdot N_{пов} + \nu_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot S_{вул}.$$

Щільності абонентів визначають наступним чином для рис. (3.1):

$$\sigma = \frac{N_{люд}}{S}.$$

Для $R_{заг}$ повинна виконуватись наступна умова:

$$R_{заг} = R_{аб} \cdot (\nu_{б\text{уд}} \cdot \sigma_{б\text{уд}} \cdot S_{заб} \cdot N_{пов} + \nu_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot S_{вул}) \leq W \cdot \beta.$$

Площа забудови у стільнику визначається:

$$S_{заб} = S_{ст} \cdot \omega_{заб}.$$

Тоді площа покриття на вулиці буде:

$$S_{вул} = S_{ст} - S_{заб} = \pi \cdot d_{\max}^2 - \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot \omega_{заб} = \pi \cdot d_{\max}^2 (1 - \omega_{заб}).$$

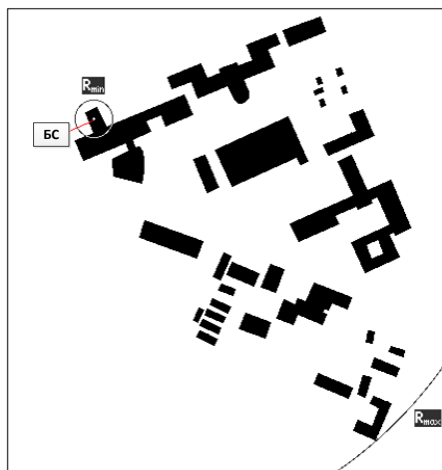


Рис.3.1. Схематичне зображення зони обслуговування базової станції (споруди показано чорним кольором)

Таким чином:

$$R_{заг} = R_{аб} \cdot (v_{б\gamma\delta} \cdot \sigma_{б\gamma\delta} \cdot \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot \omega_{заб} \cdot N_{нов} + v_{\epsilon\gamma\lambda} \cdot \sigma_{\epsilon\gamma\lambda} \cdot \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot (1 - \omega_{заб})) = \\ = R_{аб} \cdot \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot (v_{б\gamma\delta} \cdot \sigma_{б\gamma\delta} \cdot \omega_{заб} \cdot N_{нов} + v_{\epsilon\gamma\lambda} \cdot \sigma_{\epsilon\gamma\lambda} \cdot (1 - \omega_{заб})) \leq W \cdot \beta;$$

При цьому допустимі втрати радіосигналу на трасі розповсюдження радіохвиль [2]:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fid} - IM - L_{slow} - L_{мет} - L_{\phi},$$

Таким чином, підставляючи:

$$d_{\max} = 10^V;$$

де

$$V = (L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + \alpha(h_m) + K) / (44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}))$$

Тому:

$$d_{\max} = 10^{(L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + \alpha(h_m) + K) / (44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}))}; \quad (3.1)$$

Також повинна виконуватись умова:

$$d_{\max} \leq \sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{аб} \cdot \pi \cdot (v_{б\gamma\delta} \cdot \sigma_{б\gamma\delta} \cdot \omega_{заб} \cdot N_{нов} + v_{\epsilon\gamma\lambda} \cdot \sigma_{\epsilon\gamma\lambda} \cdot (1 - \omega_{заб}))}}; \quad (3.2)$$

$$h_{BC} \leq h_{BC.дон}.$$

Підставляючи (3.1) до рівняння (3.2) отримуємо:

$$\begin{aligned}
& 10 \left(L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + \alpha(h_m) + K \right) / \left(44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}) \right) \leq \\
& \leq \sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{a\bar{b}} \cdot \pi \cdot (v_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \sigma_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \omega_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + v_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot (1 - \omega_{z\bar{a}\bar{b}}))}}, \\
& \left(L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + \alpha(h_m) + K \right) / \left(44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}) \right) \leq \\
& \leq \lg \left(\sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{a\bar{b}} \cdot \pi \cdot (v_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \sigma_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \omega_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + v_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot (1 - \omega_{z\bar{a}\bar{b}}))}} \right), \\
& \lg(h_{BC}) \cdot \left(13,82 + 6,55 \cdot \lg \left(\sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{a\bar{b}} \cdot \pi \cdot (v_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \sigma_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \omega_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + v_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot (1 - \omega_{z\bar{a}\bar{b}}))}} \right) \right) \leq \\
& \leq L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + \alpha(h_m) + K + \\
& + 44,5 \cdot \lg \left(\sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{a\bar{b}} \cdot \pi \cdot (v_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \sigma_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \omega_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + v_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot (1 - \omega_{z\bar{a}\bar{b}}))}} \right). \\
& Z = \sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{a\bar{b}} \cdot \pi \cdot (v_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \sigma_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot \omega_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + v_{вул} \cdot \sigma_{вул} \cdot (1 - \omega_{z\bar{a}\bar{b}}))}}. \\
& \lg(h_{BC}) \leq \frac{L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + \alpha(h_m) + K + 44,5 \cdot \lg(Z)}{13,82 + 6,55 \cdot \lg(Z)}. \\
& h_{BC} = 10^{\frac{L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + \alpha(h_m) + K + 44,5 \cdot \lg(Z)}{13,82 + 6,55 \cdot \lg(Z)}}.
\end{aligned}$$

Вищевказану задачу оптимізації можна вирішувати за допомогою метода робочих характеристик [3].

Метод робочих характеристик полягає в наступному. Всі показники якості, крім одного, якому присвоюється перший номер, переводяться в розряд обмежень типу рівностей і шукається мінімум (за всіма строго допустимим системами) показника k_1 , тобто вирішується завдання:

$$\max(k_1), \text{ при } k_2 = k_2, k_3 = k_3, \dots, k_m = k_m. \quad (3.3)$$

Тут і далі розглядаються лише ті варіанти побудови системи, які задовольняють вихідним даним, зокрема обмеженням структури і параметрів системи і обмеженням показників якості k_1, \dots, k_m .

Нехай у результаті прийняття рішень задачі (3.3) є деяка система (клас систем) S_p , а відповідне їй мінімальне значення показника k_1 одно k_{1max} . Очевидно, результати вирішення завдання (3.3) тобто вид системи S_p і значення величини k_{1max} будуть в загальному випадку залежати від фіксованих значень k_2, \dots, k_m показників якості, переведених в розряд обмежень типу рівностей, тобто

$$p = S_p(k_2 \dots k_m), \quad (3.4)$$

$$K_{1max} = f_p(k_2, \dots, k_m), \quad (3.5)$$

Для кожної з вищезазначених проблем (із розділу 1) можливо знайти рішення, яке може бути впроваджене мобільним оператором.

Першою проблемою є складність та велика кількість обладнання сучасних базових станцій. Детальна архітектура мультистандартної (з використанням стандартів GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100, LTE-800, LTE-2600) зображена на рис. 3.2.

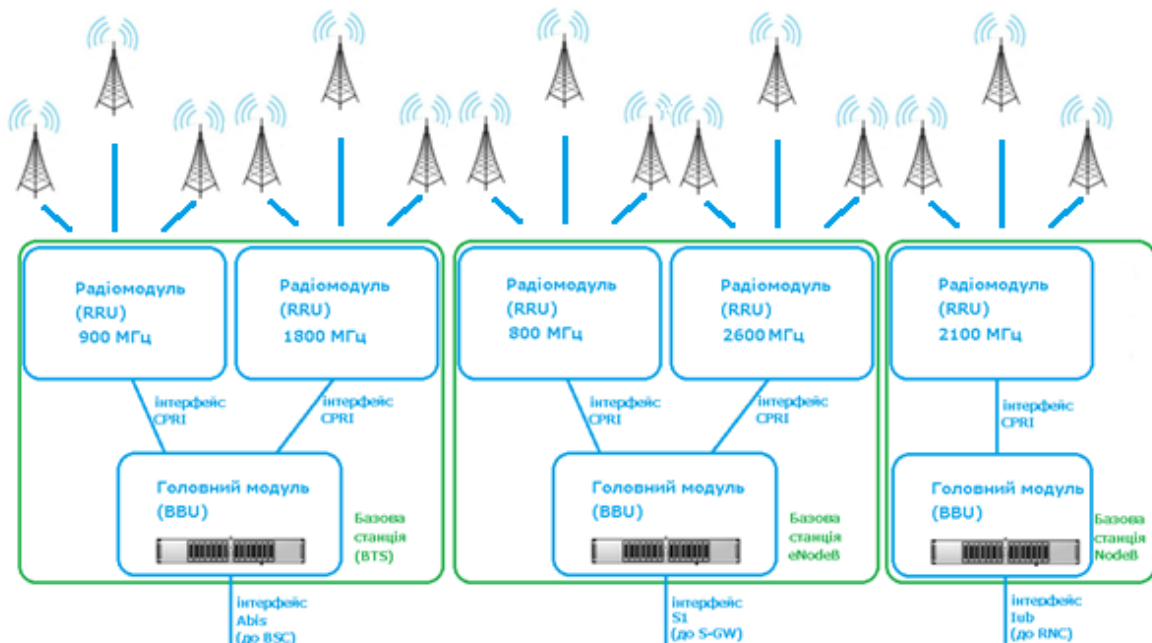


Рис. 3.2. Сучасна архітектура базових станцій

Як бачимо, при сучасному підході для реалізації такої БС потрібно мінімум 3 BBU, 5 RRU та 15 антен (кількість антен з розрахунку 3 антени на кожен частотний діапазон). Така архітектура БС є складною, габаритною, важкою для опори та незручною в експлуатації.

Першим кроком для оптимізації архітектури БС є зменшення кількості ВВU. Сьогодні зазвичай для кожного стандарту має використовуватись власний ВВU.

Зменшення кількості ВВU можна досягти завдяки використанню SDR (Software Defined Radio) – програмно-конфігурованої радіопідсистеми [4]. Ця технологія дозволяє встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи діапазон частот, тип модуляції та вихідну потужність. До спільного головного процесорного модуля можливо підключити декілька радіомодулів, кожен з яких забезпечує створення електромагнітного випромінювання в необхідному частотному діапазоні. Використання цієї технології призведе до спрощення обладнання базової станції, суттєвого зменшення габаритів обладнання, та зменшення споживаного струму.

Наступним кроком є використання активних антен, в які вмонтовано радіомодулі RRU [5]. Використання активних антен надає цілий ряд переваг. По-перше, спрощується архітектура БС, адже з неї зникають радіомодулі як окремі елементи. По-друге, зникає необхідність в використанні фідерів та малошумлячих підсилювачів, що полегшує експлуатацію і монтаж обладнання і зменшує вагу конструкції. Третя, найголовніша перевага – повністю зникає затування у фідері, що значно збільшує зону обслуговування БС.

Третім кроком є зменшення кількості антен. Сьогодні існують рішення для комбінування антен кількох частотних діапазонів у одному корпусі, що дозволить використовувати по одній антені на кожен сектор замість п'яти для кожного зі стандартів окремо. Це, по-перше, зменшить кількість антен з 15 до 3, і, по-друге вирішить усі проблеми з встановленням антен нових стандартів. Використання мультidiaпазонних антен дозволить забезпечити максимальну висоту підвісу для всіх стандартів одночасно, зекономити на антенномісцях та додаткових площах, зменшить навантаження на опору та кількість споживаної електроенергії у порівнянні з використанням однодіапазонних антен.

Четвертим рішенням для оптимізації БС є використання електричних азимутів. Це дозволить змінювати напрям антени віддалено без необхідності

підійматися на вежу, тобто забезпечить більшу гнучкість мережі. Також, завдяки електричному азимуту, можливо розташувати антени різних стандартів під кутом одне до одного. Це є великою перевагою, адже не завжди антени всіх технологій мають випромінювати електромагнітні хвилі в одну сторону (по одному азимуту) з точки зору радіопланування.

Застосування цих рішень по оптимізації базової станції значно спрощує архітектуру базових станцій. Архітектура оптимізованої базової станції зображена на рис. 3.3 [6]. Вона має лише 4 фізичних елементи (1 BBU та 3 антени з вмонтованими RRU), порівняно з 23 елементами такої ж базової станції при використанні сучасних підходів до побудови. Також цей метод оптимізації спрощує монтаж та експлуатацію обладнання, зменшує операційні та капітальні витрати оператора та завдяки зменшенню втрат електромагнітного випромінювання та збільшенні висоти підвісу антен збільшує площу покриття базовою станцією. Впровадження такої схеми побудови дозволить оператору ефективніше використовувати свої ресурси та швидше розширювати власну мережу.

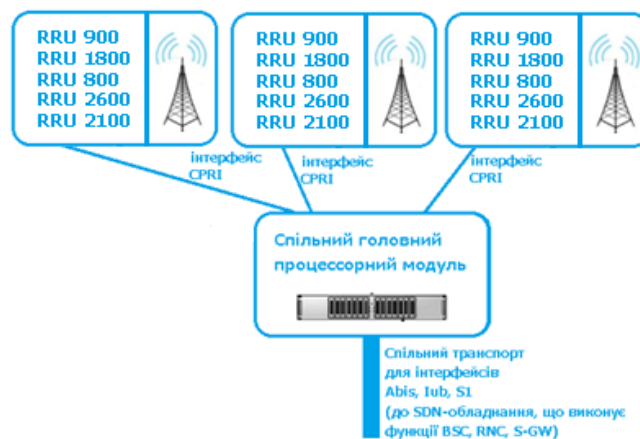


Рис. 3.3. Архітектура оптимізованої базової станції

3.2. Удосконалення підсистеми базових станцій

3.2.1. Використання SDR

Для більш ефективного використання обладнання в мережах мобільного оператора, розумним рішенням є застосування технології SDR [7].

SDR – це технологія для радіообладнання, яка дозволяє за допомогою програмного забезпечення встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи діапазон частот, тип модуляції або вихідну потужність [8].

SDR використовується як в передавальному, так і в приймальному обладнанні. SDR-приймач може стати єдиним модулем у смартфоні, що замінить одночасно GSM, Wi-Fi, Bluetooth та GPS модулем, завдяки можливості оброблювати сигнали будь-якого діапазону частот [9].

Технологія SDR може принести користь наступним чином. Можливо до спільного головного процесорного модуля підключити декілька радіомодулів, кожен з яких забезпечує створення електромагнітного випромінювання в необхідному частотному діапазоні. Який стандарт зв'язку буде при цьому створюватися, визначається процесорним блоком і стратегією оператора по рефармінгу одних стандартів в інші.

Отже, використовуючи SDR в стільникових мережах, буде зменшено кількість модулів BBU (Baseband Unit), чим спростимо мережеве обладнання. Крім того, можливе використання спільного транспорту для передачі інформації по трьом різним інтерфейсам для мереж різних поколінь. Інтерфейс від процесорного блоку до радіопередавача стандартизований, і всі виробники пропонують свої варіанти реалізації протоколу CPRI (Common Public Radio Interface). Останні реалізації протоколу CPRI підтримуються також і виробниками обладнання транспортної мережі, наприклад, радіорелейних ліній, що дозволяє підключати радіопередавачі на значних відстанях від процесорного блоку [10].

Мобільна мережа, побудована таким чином, дозволяє створювати сучасні мобільні мережі, на яких легко можна переходити від стандарту до стандарту (GSM-UMTS-LTE-5G) і надавати новітні послуги в найкоротші терміни.

3.2.2. Використання активних антен для оптимізації базових станцій

Сучасні антени мобільних операторів є пасивними – тобто такими, що лише випромінюють електромагнітні хвилі, але не генерують їх самостійно. Активні антени [11] є також і генераторами електромагнітного випромінювання. Це досягається завдяки монтуванню в антену радіомодулів.

Розглянемо переваги, які надає використання активних антенних систем для мобільних операторів:

- збільшення еквівалентної потужності випромінювання антени завдяки відсутності затухання сигналу між радіомодулем та антенною, що призводить до збільшення площі покриття;

- спрощення монтажу і експлуатації, завдяки зменшенню кількості обладнання і використання оптоволоконних патчкордів замість масивних товстих негнучких фідерів;

- зникнення потреби у використанні малошумлячих підсилювачів.

- зменшення навантаження на опору, адже монтовані радіомодулі легші, ніж фідерні траси чи виносні радіомодулі;

- зменшення електроживлення.

Не зважаючи на велику кількість явних переваг, використання активних антен має певні недоліки, такі як:

- збільшення ваги і габаритів самої антени;

- при необхідності ремонту радіомодуля необхідно демонтувати й саму антену.

Хоча такі антени й не позбавлені недоліків, все ж ці недоліки не є значними, а тому не можуть стати на заваді широкому впровадженню активних антенних систем.

3.2.3. Використання мультистандартних антен для оптимізації БС

Мультидіапазонна (мультистандартна, комбінована) антена насправді являє собою кілька антен, скомбінованих у одному корпусі. В цьому корпусі

антени розміщені одна під одною (рис 3.4.). Кожна з антен може випромінювати лише у заданому для неї частотному діапазоні. При цьому антени в корпусі сучасної мультистандартної антени мають різні непов'язані електричні кути нахилу, а тому можуть бути нахилені під різними кутами.

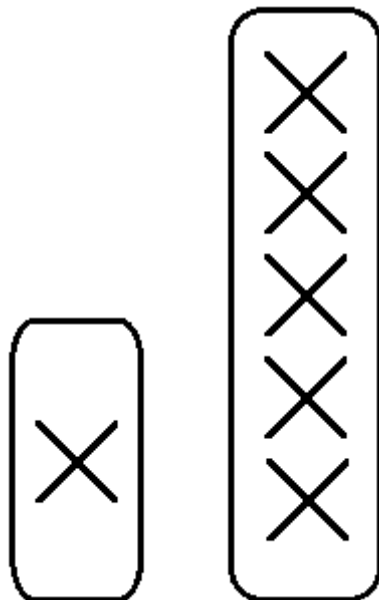


Рис. 3.4. Схематичне порівняння висоти одностандартної (зліва) та п'ятистандартної (зправа) антен

Одностандартна антена, незалежно від покоління зв'язку може бути реалізована з використанням двох портів (входів). В один, зазвичай ввімкнений один передавач і один приймач (Tx/Rx), в інший – тільки приймач (Rx). Можливі також комбінації Tx/Rx-Tx/Rx або Tx-Rx. Щоб реалізувати мультистандартну антену необхідно збільшити кількість портів (хоча б по 2 для кожного стандарту), як на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Схематичне порівняння товщини і ширини одностандартної (зліва) та п'ятистандартної (зправа) антен

Мультидіапазонна антена має такі переваги:

- спрощення експлуатації обладнання через зменшення кількості антен;
- значне зменшення навантаження на опору по цим же причинам;

- можливість розмістити всі стандарти якомога вище на опорі;
- економія на орендній платі за антенні місця;
- зменшення споживаної електроенергії.

Проте існують і певні недоліки такої реалізації. Перший це збільшення ваги і габаритів такої антени. Але цей недолік повністю нівелюється тим, що сумарна вага і габарити п'яти антен значно більші. Іншим серйозним недоліком є необхідність направити антени всіх стандартів по одному азимуту. При радіоплануванні не часто виникає потреба направляти антени різних діапазонів в один бік, адже планування мереж різних стандартів значно відрізняється. Для того, щоб позбавити оптимізовану архітектуру БС цього недоліку, і запропоноване наступне рішення.

3.2.4. Використання антен з електричним азимутом для оптимізації базових станцій

Електричний азимут в антені дозволяє віддалено змінювати напрям антени на певну кількість градусів.

При використанні мультистандартної антени, електричний азимут кожної з них має бути незалежним один від одного, що зробить можливим розташування антени різних стандартів під кутом.

При плануванні не рекомендується змінювати азимут вже існуючих антен. Але якщо встановити комбіновану антену, то це автоматично встановлює азимут антени нового стандарту таким же, як і попереднього. Використання електричного азимуту дозволяє змінити кут нового стандарту при потребі.

Зазвичай електричний азимут обмежений певною кількістю градусів, що не дозволяє направляти антени куди завгодно. Це дещо обмежує можливості планування. На рис. 3.6. заштрихованим зображені «сліпі зони», куди не можливо направити антени при обмеженні електричного азимуту в 20 градусів (за умови, що зараз антени встановлені за азимутами 0, 120, 240 градусів).

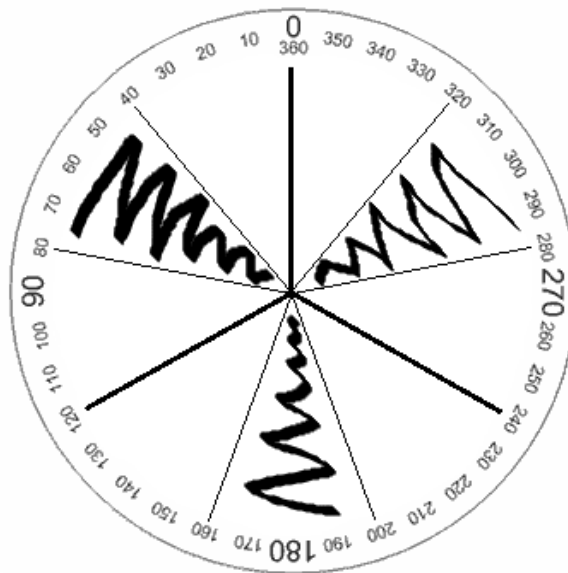


Рис. 3.6. Сліпі зони з використанням електричного азимуту в 20 градусів

На рис 3.6. показана можливість направити антену на 40 градусів від положення існуючої антени. Число в 40, а не 20 градусів можливе, адже антену старого стандарту можна направити на 20 градусів вліво, а нового – на 20 градусів вправо. В сумі це дає можливість поставити дві антени всередині комбінованого корпусу під кутом 40 градусів.

При цьому матимемо три сліпі зони шириною в 40 градусів. При використанні антени з електричним азимутом в 30 градусів ширина цих сліпих зон сягне 20 градусів. При використанні антени з електричним азимутом в 40 градусів сліпі зони зникнуть повністю. Але реалізація антен з такими великими кутами електричних азимутів значно ускладнює конструкцію і збільшує ширину антени.

3.2.5. Моделювання рівня прийнятого сигналу та зони обслуговування базової станції

3.2.5.1. Параметри, що впливають на якість з'єднання

Можливість встановлення з'єднання та якість передачі даних напряму залежить від прийнятого рівня сигналу. Чим більший цей рівень сигналу, тим

на кращий сервіс може розраховувати абонент, тобто на більшу швидкість передачі даних і меншу затримку.

Швидкість передачі даних залежить від обраної схеми кодування та модуляції, які, в свою чергу, обираються в залежності від вимірних параметрів каналу зв'язку – тобто від рівня прийнятого сигналу і від відношення сигнал/шум. Абонент, що знаходиться в ідеальних радіоумовах завжди отримуватиме максимальну швидкість, обмежену лише можливостями стандарту, який його обслуговує (GPRS, EDGE, HSPA, HSPA+, LTE та ін.).

Отже, підвищення рівня прийнятого сигналу є важливою задачею для оператора мобільного зв'язку.

Розглянемо, що саме впливає на рівень прийнятого сигналу:

- потужність передавача;
- втрати в антенно-фідерному тракті;
- коефіцієнт підсилення передавальної антени;
- втрати у вільному просторі;
- коефіцієнт підсилення приймальної антени.

В даному розділі був запропонований спосіб зменшення втрат у антенно-фідерному тракті завдяки використанню активних антен з вбудованими радіомодулями [11]. Також був запропонований спосіб зменшення втрат у вільному просторі, що досягається завдяки збільшенню висоти підвісу антени, що стає можливим при використанні мультистандартних антен.

Єдиний параметр зі списку, що не знаходиться під повним контролем мобільного оператора – це втрати у вільному просторі. Ці втрати призводять до ослаблення сигналу, при його при проходженні від передавача до приймача. Для їх оцінки застосовуються моделі розповсюдження радіохвиль, рекомендовані у розділі 2.

Є багато методів моделювання втрат поширення сигналу [12]. Методи моделювання відрізняються, але всі вони використовують відстань між передавачем і приймачем, як основний (критичний) параметр. Інші ефекти можуть також враховуватися на додаток до даного основного параметру [13].

Так, параметрами, які враховуються моделями розповсюдження є: висоти передавача та приймача, частота сигналу, тип місцевості тощо. Розглянемо в якості прикладу розрахунку втрат в діапазоні частот до 2ГГц модель розповсюдження радіохвиль Окумура-Хата та її розширення Cost-231 Хата.

Побудуємо в середовищі Mathcad залежність напруженості електромагнітного поля від відстані. Розрахунки проведемо для діапазону частот 800 МГц. 800 МГц є одним із можливих діапазонів частот, що буде використовуватись для LTE в Україні, і вже широко застосовується для цих цілей у світі. Крім цього діапазону також часто використовуються діапазони в 1800 МГц, 2300 МГц, 2600 МГц.

Розрахунки проведемо для трьох методів побудови БС – традиційних з підключеннями фідерів $7/8''$ і $1/2''$ та оптимізованого методу. Оцінка напруженості електричного поля в точці прийому визначаємо за формулами:

$$E_R(h_{BS}, R) = 39,82 + P_{BS} - 6,16 \cdot \log(f) + 13,82 \cdot \log(h_{BS}) + a(h_{MS}) - (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{BS})) \cdot (\log(R))^\gamma,$$

$$E_{R_{7_8}}(h_{BS}, R) = 39,82 + P_{BS_{7_8}}(h_{BS}) - 6,16 \cdot \log(f) + 13,82 \cdot \log(h_{BS}) + a(h_{MS}) - (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{BS})) \cdot \log(R)^\gamma,$$

$$E_{R_{1_2}}(h_{BS}, R) = 39,82 + P_{BS_{1_2}}(h_{BS}) - 6,16 \cdot \log(f) + 13,82 \cdot \log(h_{BS}) + a(h_{MS}) - (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{BS})) \cdot \log(R)^\gamma.$$

При цьому використаємо наступні значення параметрів для розрахунків:

$$h_{MS} = 1,5 \text{ м}, f = 800 \text{ МГц}, \gamma = 1,$$

$$a(h_{MS}) = (1,1 \cdot \log(f) - 0,7) \cdot h_{MS} - (1,56 \cdot \log(f) - 0,8).$$

Висоту антени було обрано 1,5 м, як висота яку матиме МС при використанні людиною середнього зросту, що не знаходиться всередині будівлі.

Для визначення еквівалентної випромінюваної потужності передавача потрібно від потужності передавача відняти втрати у антенно-фідерному тракті. Для оптимізованого підходу ці втрати будуть рівні нулю, через те, що радіомодуль є безпосередньо частиною антени. Отже, еквівалентна випромінювана потужність для оптимізованої БС дорівнюватиме потужності передавача. В інших випадках враховуються втрати в фідері та втрати у конекторах з обох кінців цих фідерів.

Для підключення feederline застосовується фідер 7/8'', затухання якого показано в таблиці 3.1 [14]. При цьому його довжина більша за висоту підвісу БС, тому що RRU знаходиться в приміщенні поряд. Тому при розрахунках за довжину фідера візьмемо висоту підвісу і додамо 10 м.

Таблиця 3.1

Частота, МГц	Затухання, дБ/100м
174	1.48
450	2.44
800	3.32
900	3.54
1800	5.17
2000	5.48
2400	6.07
5000	9.26

При підключенні feederless використовується фідер 1/2'', затухання якого показано в таблиці 3.2 [15]. При цьому його довжина зазвичай складає 5-7 м. Тому при розрахунках довжину фідера візьмемо рівною 6 м.

Таблиця 3.2

Величина затухань

Частота, МГц	Затухання, дБ/100м
174	2.86
450	4.72
800	6.43
900	6.85
1800	10.00
2000	10.70
2400	11.80
6000	20.20

Затухання в конекторах складає 0,15 дБ. Потужність передавача візьмемо рівною 20 Вт (що дорівнює 43 дБм чи 13 дБВт). З урахуванням вище представленого математичного апарату для оцінки еквівалентної випромінюваної потужності отримаємо:

$$P_{BS_7_8}(h_{BS}) = P_{BS} - \frac{3.32}{100} \cdot (h_{BS} + 10) - 0.15 \cdot 2$$

$$P_{BS_1_2}(h_{BS}) = P_{BS} - \frac{6.43}{100} \cdot 6 - 0.15 \cdot 2$$

Побудуємо графіки залежностей напруженості електромагнітного поля від відстані. При цьому, врахуємо, що за підходів feederline та feederless, антени LTE потрібно вішати під існуючими антенами GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100, тобто хоча б на 9 м нижче за існуючі антени. При використанні оптимізованого методу побудови БС антени LTE розміщуються на рівні найвищих з цих антен, так як антени всіх стандартів комбінуються в одному корпусі. Для розрахунку висоту підвісу антен при використанні підключень feederline та feederless приймемо за 31 м, а при оптимізованому підході – 40 м. Графіки вищезгаданих залежностей показано на рис 3.7. Червона лінія – оптимізована БС, синя лінія – підключення feederless, зелена лінія – підключення feederline.

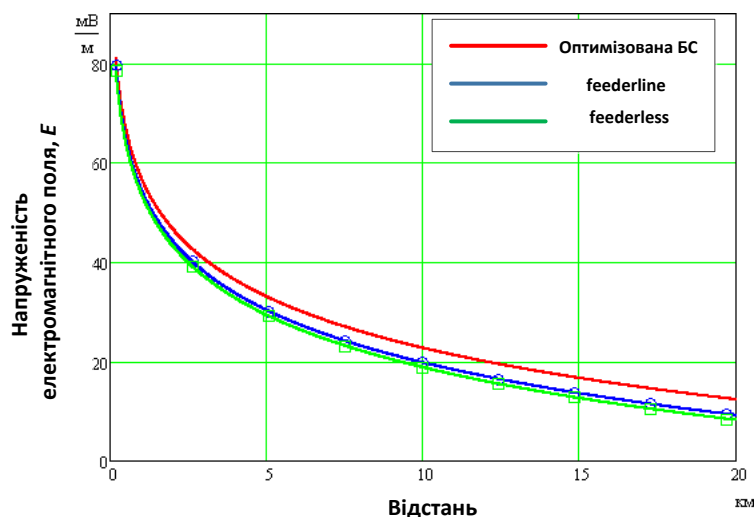


Рис 3.7. Напруженість електромагнітного поля прийнятого сигналу розрахована за моделлю Окумури-Хата

З графіку можна зробити висновок, що напруженість поля в приймачі для LTE-800 вище при використанні запропонованого підходу до будівництва БС. Це доводить, що запропонований метод оптимізації БС ефективніший за існуючі.

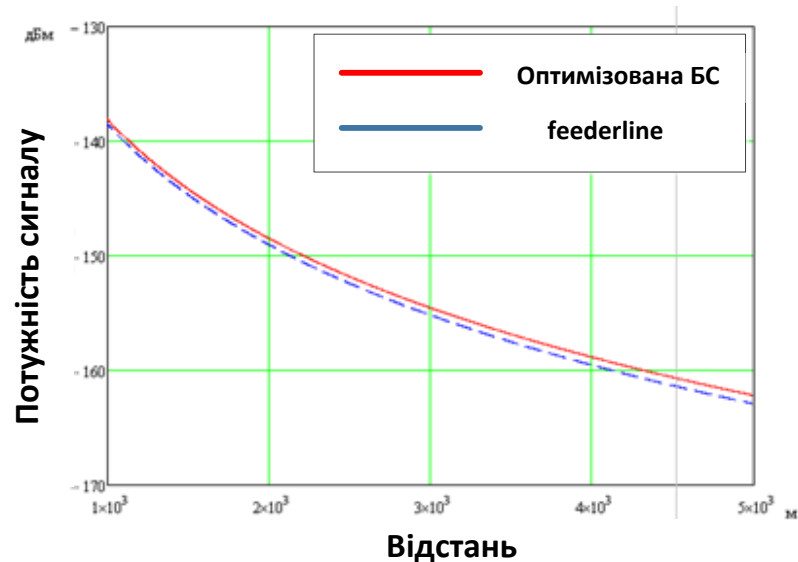


Рис. 3.8. Затушення сигналу в вільному просторі, розраховане за моделлю Хата Cost-231

З рис 3.8. бачимо, що втрати при використанні мультистандартних антен трохи нижчі, ніж при використанні одностандартних антен. Щоб більш точно оцінити кількісно вигрощ, побудуємо графіки, що показують різницю в втратах сигналу при висоті в 40 м та при інших висотах. Візьмемо до уваги, що не завжди антени UMTS-2100 можна розмістити одразу під антенами GSM. Часто антени потрібно розміщати ще нижче, щоб уникнути впливу відтяжок від щогл, щоб задовольнити вимог до опори по навантаженню, через обладнання інших операторів, що вже розміщено на опорі. Тому розглянемо наскільки менші втрати на висоті підвісу 40 м в порівнянні з 34, 30 і 20 метрами. Відповідні графіки за результати проведеного моделювання показані на рис. 3.9.

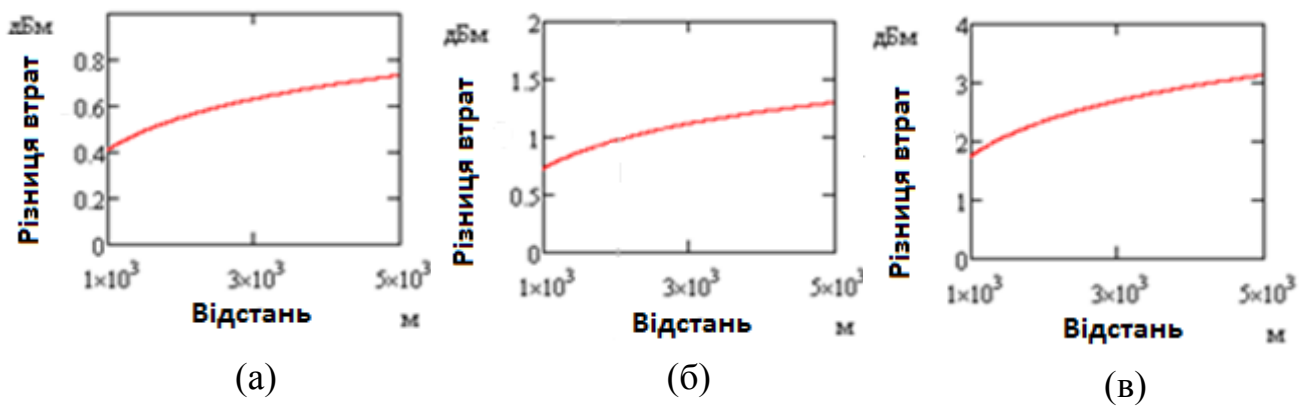


Рис. 3.9. Різниця в втратах сигналу між висотою підвісу антени в 40 м та висотами в 34 м (а), 30 м (б) і 20 м (в)

З цих графіків видно, що вигреш в рівні сигналу при збільшенні висоти підвісу не дуже значний – до 0,7 дБ. Втім, в поодиноких випадках таке збільшення рівня сигналу може призвести до покращення сервісу. Значно іншу картину бачимо при зміні висоти підвісу від 40 м до 20 м – маємо збільшення рівня сигналу в приймачі до 3,2 дБ. Таке збільшення рівня сигналу вже є досить значним і часто призводитиме до покращення швидкості передачі даних для абонентів. Отже, при ситуаціях, коли UMTS антену потрібно розміщувати значно нижче за вже існуючі (насправді, ситуація, за якої висота підвісу UMTS на 20м нижча за висоту підвісу GSM не є рідкістю), використання мультистандартних антен призводить до відчутного покращення рівня сигналу. Це доводить раціональність запропонованого методу оптимізації БС мобільного оператора.

3.2.5.2. Розрахунок рівня прийнятого сигналу

Розрахунок рівня сигналу, прийнятого МС є важливою задачею для аналізу ефективності запропонованого методу оптимізації. Попередні розрахунки довели те, що оптимізована БС об'єктивно краща за існуючі підходи до побудови БС. Оцінка втрат за моделлю Хата Cost-231 [16, 17] доводить ефективність використання мультистандартних антен, показуючи, на скільки покращився рівень сигналу. Але модель Хата Cost-231 дає можливість оцінити лише втрати у вільному просторі, а отже не бере до уваги покращення, які дає оптимізована структура в антенно-фідерному тракті. Розрахунки за моделлю

Хата враховують і антено-фідерний тракт, і їх результати показують збільшення напруженості електромагнітного поля при використанні оптимізованого методу побудови БС.

Але дані, отримані з попередніх розрахунків не дають зрозуміти, що саме ми отримаємо завдяки такому покращенню. Тому необхідно провести більш показову кількісну оцінку – показати наскільки збільшилася площа покриття БС мобільного оператора у порівнянні з традиційними підходами. Перший крок до визначення площі покриття – обчислення рівня прийнятого мобільною станцією сигналу.

Як вже було сказано раніше, на рівень прийнятого сигналу впливає потужність передавача, втрати в антенно-фідерному тракті, коефіцієнт підсилення передавальної антени, втрати у вільному просторі, коефіцієнт підсилення приймальної антени.

Виходячи з цього, залежність рівня прийнятого сигналу від відстані для трьох підходів в залежності від відстані в середовищі Mathcad можна розрахувати наступним чином:

$$P_{MS}(h_{BS}, d) = P_{BS} + G_{BS} + G_{MS} + L_{city}(h_{BS}, d)$$

$$P_{MS_7_8}(h_{BS}, d) = P_{BS_7_8}(h_{BS}) + G_{BS} + G_{MS} + L_{city}(h_{BS}, d)$$

$$P_{MS_1_2}(h_{BS}, d) = P_{BS_1_2} + G_{BS} + G_{MS} + L_{city}(h_{BS}, d)$$

При цьому за втрати в вільному просторі, що використовуються для даної формули, візьмемо втрати, вже розраховані за моделлю Хата Cost-231.

Коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антени приймемо відповідно: $G_{BS} = 18$ дБі та $G_{MS} = 3$ дБі.

Скориставшись таблицями 3.1 та 3.2 оцінимо потужність на вході антени, використавши затухання для частоти в 2100 МГц. Затухання в конекторах також приймемо більшим для вищої частоти:

$$P_{BS} = 43 \text{ дБм,}$$

$$P_{BS_7_8}(h_{BS}) = P_{BS} - \frac{6.07}{100} \cdot (h_{BS} + 10) - 0.5 \cdot 2$$

$$P_{BS_1_2} = P_{BS} - \frac{11.8}{100} \cdot 6 - 0.5 \cdot 2$$

Графік залежності рівня прийнятого сигналу від відстані для трьох підходів до побудови БС зображено на рис. 3.10.

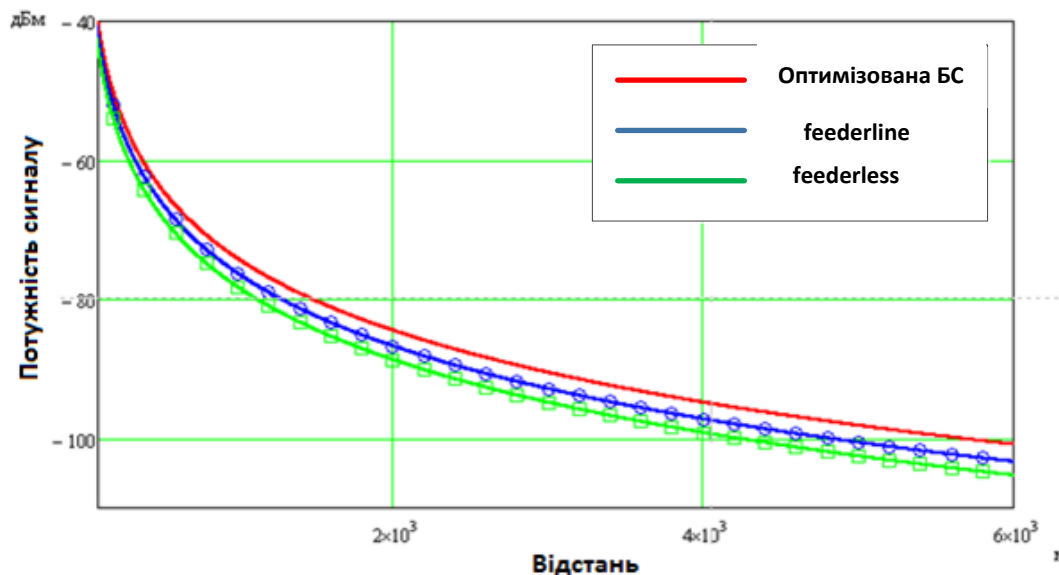


Рис. 3.10. Рівень прийнятого сигналу (втрати розраховані за моделлю Хата Cost-231)

На рис. 3.10 червона лінія показує рівень сигналу для оптимізованої БС, синя лінія – для підключення feederless, зелена лінія – для підключення feederline. Знову використаємо висоту 40 м для оптимізованої БС, а висоти 34 м – для двох традиційних підходів.

З графіку (рис. 3.10) зрозуміло, що рівень сигналу вищий при використанні оптимізованої БС. В UMTS для стабільного зв'язку прийнятий рівень сигналу має бути більшим, ніж -100 дБм. Розрахуємо з допомогою Mathcad, яку відстань має пройти сигнал для того, щоб його рівень став менше за -100 дБм.

Для оптимізованої БС:

Given

$$P_{MS}(40, d) = -100 \text{ дБм}$$

$$D_1 = \text{Find}(d) = 5645.77 \text{ м}$$

Для БС з підключенням feederline:

Given

$$P_{MS_1_2}(34, d) = -100 \text{ дБм}$$

$$D_2 = \text{Find}(d) = 4797.02 \text{ м}$$

Для БС з підключенням feederless:

Given

$$P_{MS_7_8}(34, d) = -100 \text{ дБм}$$

$$D_3 = \text{Find}(d) = 4213.87 \text{ м}$$

D_1, D_2, D_3 – відстані, після яких рівень прийнятого сигналу буде нижчий за -100 дБм. Отримані значення дають змогу зрозуміти, що відстань від БС, на якій абонент має можливість здійснити дзвінок чи передачу даних є значно більшою при запропонованому методі оптимізації. Але для більш інформативного і точного результату розрахуємо не відстань до БС, а площу покриття, та порівняємо ці площі для різних підходів до побудови БС.

3.2.5.3. Розрахунок площі покриття

З врахуванням цієї інформації зобразимо схематично, як збільшилася площа покриття БС при використанні оптимізованого методу побудови (рис 3.11).

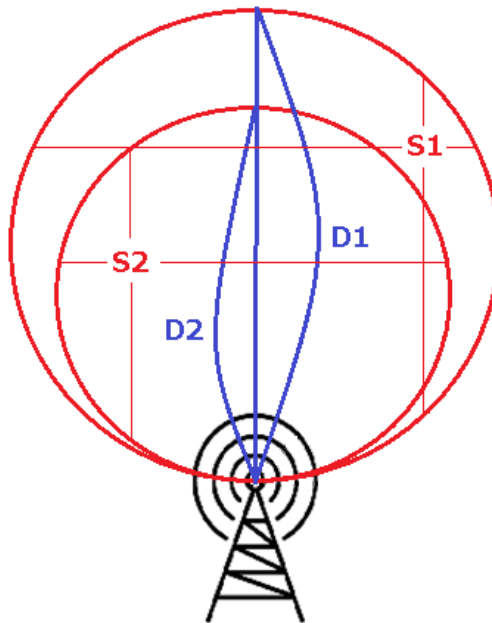


Рис. 3.11. Схематичне зображення збільшення зони обслуговування БС

Потрібно зрозуміти, на скільки відсотків збільшилася площа покриття оптимізованої БС в порівнянні з традиційними БС. Для цього необхідно від площі покриття оптимізованої БС відняти площу покриття БС, з якою порівнюється оптимізована.

Розрахуємо площі покриття БС, побудованих по трьом досліджуваним схемам.

Площа покриття оптимізованої БС становить 25 км²:

$$S_1 = \pi \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = 2.5 \times 10^7 \text{ м}^2.$$

Площа покриття БС з підключенням feederless складає 18 км²:

$$S_2 = \pi \cdot \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 = 1.81 \times 10^7 \text{ м}^2.$$

Площа покриття БС з підключенням feederline – 14 км²:

$$S_3 = \pi \cdot \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 = 1.39 \times 10^7 \text{ м}^2.$$

Отже, площа покриття оптимізованої БС більша за площу покриття БС з підключенням feederless на:

$$\frac{S_1 - S_2}{S_2} = 38.52\%.$$

Площа покриття оптимізованої БС більша за площу покриття БС з підключенням feederline на:

$$\frac{S_1 - S_3}{S_3} = 79.51\%.$$

Отримані цифри доводять, що запропонований метод оптимізації БС є надзвичайно ефективним. Реальною перевагою такого методу є суттєве збільшення зони обслуговування БС мобільного оператора, як в порівнянні з більш застарілим, так і з сучасним підходами до побудови БС.

3.3. Метод розвантаження радіоінтерфейсу базових станцій стільникового оператора

3.3.1. Модель розвантаження радіоінтерфейсу

З метою визначення необхідної пропускної здатності було проведено аналіз вимог до якості обслуговування різних типів додатків, наприклад [18]. Ці дані зведені до таблиці 3.3.

Таким чином, проаналізувавши дані, наведені в табл. 3.3, можна зробити висновок про те, що для задовільного використання сучасних додатків та послуг є необхідною є одночасні висока пропускна здатність та низький рівень затримки.

Потім було розроблено модель оцінки необхідної пропускної здатності стільникових мереж. Пропускна здатність мережі дорівнює спектральній ефективності, помноженій на ширину частотної смуги, яка виділена певній радіотехнології.

Таблиця 3.3

Рекомендовані параметри каналу, що дозволяють використання різних інтернет-послуг

Вид послуги	Швидкість [Mbs]:					Ping
	0.1-0.3	0.3-1	1-2	2-6	6<	
Гра «Realtime»	-	-	-	+	+	0-30 ms
Skype виклик абонента, VoIP	+	+	+	+	+	0-150ms
Skype відеозв'язок, демонстрація екрану	-	+	+	+	+	
Skype груповий відеозв'язок (3 учасника)	-	-	-	+	+	
Hangouts – груповий відеозв'язок (5 учасників)	-	-	-	+	+	
WWW (інтернет серфінг)	-	-	+	+	+	0-200ms
Соціальні мережі	-	-	+	+	+	
Інша гра	-	-	+	+	+	
YouTube 480p, відео SD	-	-	+	+	+	
YouTube відео HD	-	-	-	-	+	

Таким чином:

$$C_{BC} = \beta \times \Delta f,$$

де: Δf – ширина частотної смуги (МГц), β – спектральна ефективність, яка залежить від методу модуляції (біт/с/Гц).

Згідно релізів 3GPP спектральна ефективність для різних технологій складає величину β_{3GPP} .

Оцінка необхідної пропускної здатності радіоінтерфейсів БС відбувається наступним чином:

$$C_{serv} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_9 \end{pmatrix}, N_t = \begin{pmatrix} N_{1,1} & N_{1,2} & N_{1,3} & N_{1,4} \\ N_{2,1} & N_{2,2} & N_{2,3} & N_{2,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{9,1} & N_{9,2} & N_{9,3} & N_{9,4} \end{pmatrix}.$$

$$C_{sum} = C_{serv} \cdot N_t$$

де t – відповідні часові проміжки (1 – ранок; 2 – день; 3 – вечір; 4 – ніч); C_{serv} – необхідна пропускна здатність каналу для забезпечення якісного надання послуг; N_t – кількість абонентів стільникового зв'язку, що користуються рядом послуг в певні проміжки часу.

Розрахована сумарна пропускна здатність не має перевищувати пропускну здатність, що виділяється БС.

$$C_{sum} \leq C_{BC}.$$

Таким чином, остання нерівність може бути записана у наступному вигляді:

$$C_{sum} \leq \beta_{3GPP} \times \Delta f.$$

В сучасних радіотехнологіях оператори можуть використовувати не всю ширину каналу, а лише агрегувати потрібні (або доступні) несучі. В цьому випадку остання нерівність буде мати вигляд:

$$C_{sum} \leq \beta_{3GPP} \times \Delta f_{нес.} \times N_{нес.}, \quad (3.4)$$

де $\Delta f_{нес.}$ – ширина каналу однієї несучої; $N_{нес.}$ – кількість використаних несучих частот.

3.3.2. Алгоритми розвантаження

У випадку, коли остання нерівність (3.4) не виконується, тобто БС вже не здатна обслуговувати всіх абонентів, виникає необхідність розвантаження 3GPP-радіоінтерфейсу. Тому було проведено порівняльний аналіз методів [19-23], які можуть бути для цього використані (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Порівняльна характеристика методів розвантаження

Параметр для порівняння	Femtocell	Wi-Fi
Ширина спектру та вартість	-	+
Висока пропускна здатність мережі	-	+
Висока швидкість обміну даними	-	+
Безпека	+	+
Якість обслуговування (QoS)	+	+
Відповідність стандартам	+	+
Масштабованість	-	+
Ефективність витрат	-	+

Тому із використанням мереж не-3GPP, а саме Wi-Fi, було розроблено алгоритми розвантаження мережі мобільного оператора, які можуть бути використані для мережевої архітектури, зображеної на рис. 3.12 [24, 25].

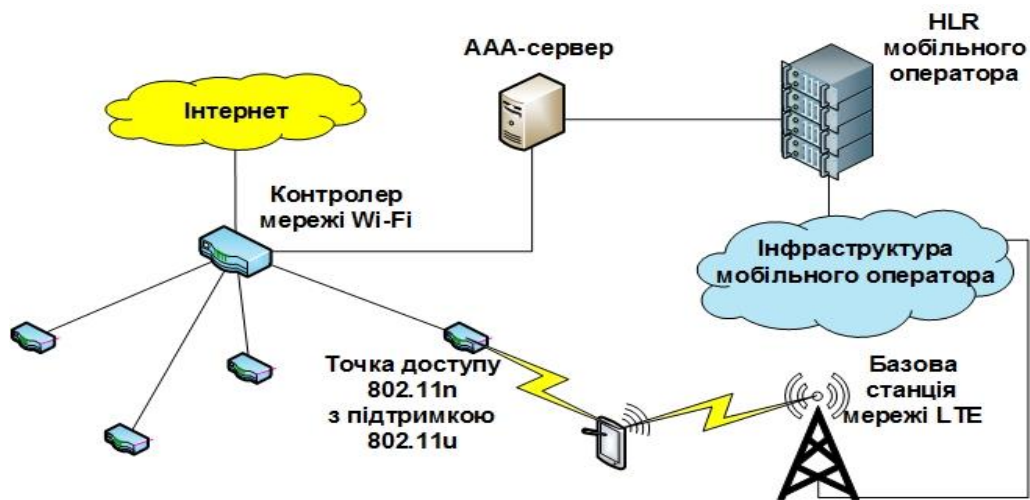


Рис. 3.12. Структура мережі із розвантаженням радіоінтерфейсу

Мобільний пристрій приймає рішення про передачу інформації. Після цього розвантаження мережі оператора може відбуватися за трьома сценаріями.

Залежно від сервісу приймається рішення про вибір мережі для передачі:

Сценарій 1. За наявності довіреної Wi-Fi мережі та при перенавантаженості (або слабкому сигналі) БС для передачі буде використовуватися довірена мережа Wi-Fi.

Сценарій 2. При великому обсязі інформації, передача здійснюватиметься мережею оператора та довіреною мережею, при цьому використовуватиметься протокол МТСП.

Сценарій 3. У крайніх випадках (великий потік даних та перезавантаженість базової станції) передача може здійснюватися недовіреною мережею.

Надалі наведемо більш детально алгоритм роботи мережі для кожного зі сценаріїв.

Сценарій 1. UE отримує сигнал від eNodeB з інформацією про рівень сигналу та про наявність вільних каналів для передачі даних.

Якщо такі канали відсутні або сигнал від базової станції занадто слабкий, виконується пошук довіреної мережі Wi-Fi.

Якщо така мережа знайдена, виконується автентифікація UE за допомогою механізму EAP-SIM/EAP-AKA.

Виконується встановлення з'єднання UE з шлюзом TWAG (Trusted Wireless Access Gateway).

За наявності у UE номеру IMSI встановлюється захищений тунель між TWAG та P-GW (Packet Gateway).

Сценарій 2. UE визначає, що для передачі та прийому даних необхідна висока пропускна здатність і приймає рішення про використання різних технологій одночасно.

Виконується пошук довіреної мережі.

Якщо така мережа знайдена, виконується аутентифікація UE за допомогою механізму EAP-SIM/EAP-AKA.

Виконується встановлення з'єднання UE з шлюзом TWAG (Trusted Wireless Access Gateway).

За наявності у UE номеру IMSI встановлюється захищений тунель між TWAG та P-GW (Packet Gateway). (Вважається, що з'єднання з eNodeB вже було встановлено).

UE приймає рішення про використання протоколу MTCP.

Встановлюється MTCP з'єднання з PDN (Packet Data Network).

Сценарій 3. UE отримує сигнал від eNodeB з інформацією про рівень сигналу та про наявність вільних каналів для передачі даних.

UE визначає, що для передачі та прийому даних необхідна висока пропускна здатність і приймає рішення про використання різних технологій одночасно.

Виконується пошук довіреної мережі.

Якщо така мережа не знайдена, але знайдена недовірена мережа, встановлюється з'єднання UE з ePDG (Evolved Packet Data Gateway) в EPC через захищений IPSec тунель.

Виконується встановлення з'єднання ePDG з P-GW через захищений тунель GTP або PMIP (вважається, що з'єднання з eNodeB вже було встановлено).

UE приймає рішення про використання протоколу MTCP.

Встановлюється MTCP з'єднання з Packet Data Network.

Дані три сценарії було узагальнено у один алгоритм (рис. 3.13).

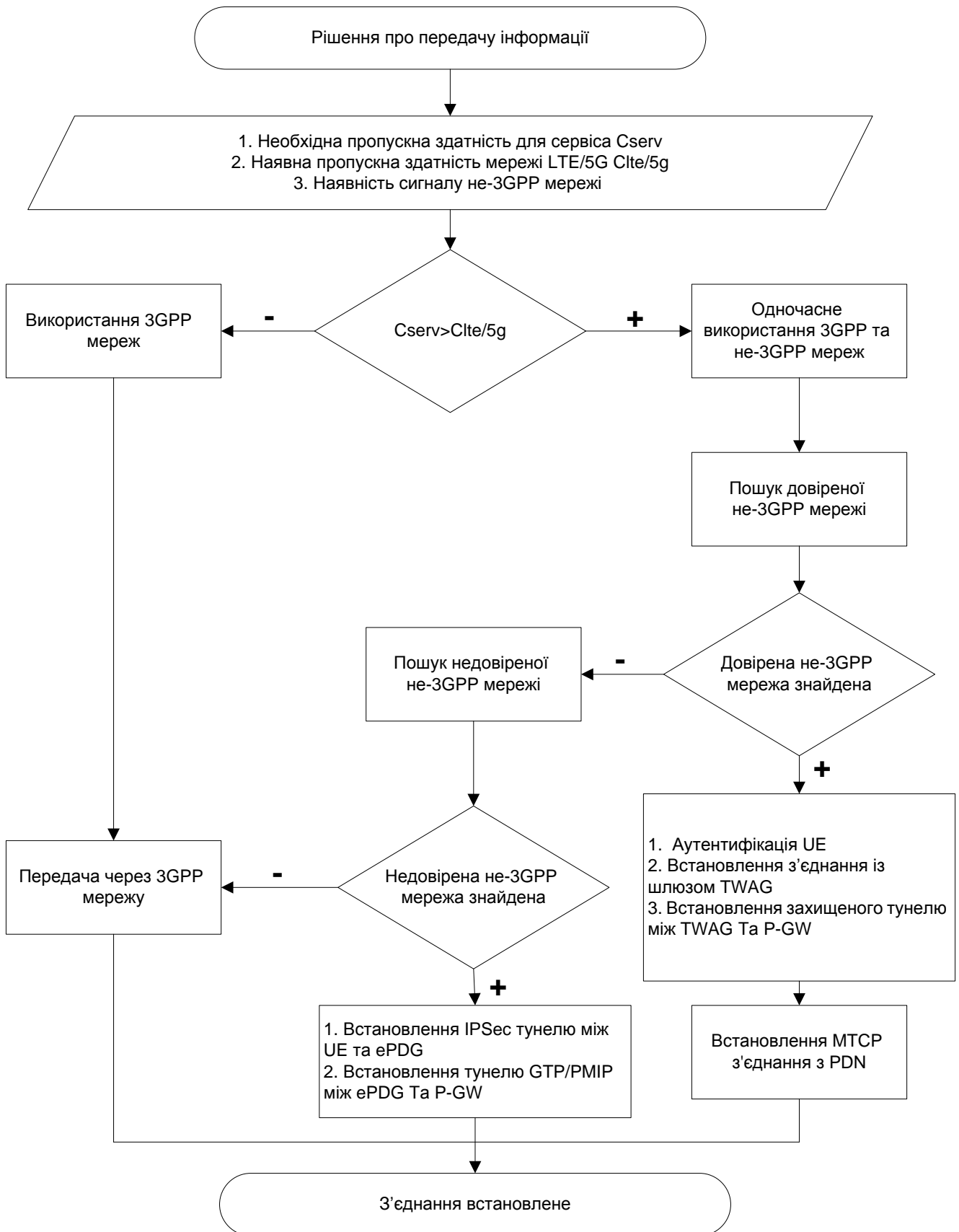


Рис. 3.13. Узагальнений алгоритм розвантаження радіоінтерфейсу

Для розвантаження радіоінтерфейсу та інших операцій в сучасній архітектурі стільникових мереж доцільно використовувати мережі SDN [25] (рис. 3.14).

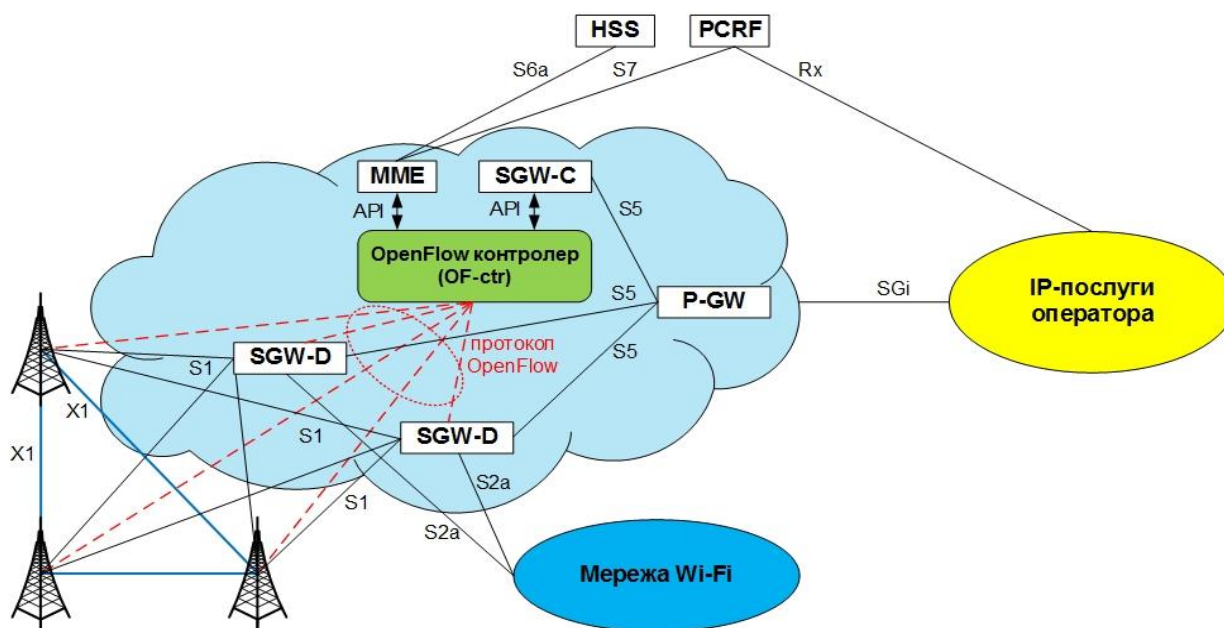


Рис. 3.14. Використання контролеру SDN для розвантаження радіоінтерфейсу

Таким чином, в даному підрозділі було запропоновано алгоритм розвантаження радіоінтерфейсу з використанням багатоканальної передачі даних. Проте, тоді виникає проблема оптимальної маршрутизації в транспортній мережі. Тому надалі в розділі 4 було запропоновано нову більш ефективну метрику для вибору оптимального маршруту в умовах багатоканальної передачі.

3.3.3. Удосконалення архітектури мереж 5G для забезпечення багатоканальної передачі даних

Як показав змістовний аналіз нових релізів, що стосуються мереж 5G (TS 502.1 [26] та TS 502.2 [27]), в них відсутній функціонал багатоканальної передачі даних. Тому в рамках виконання проекту 5G-Xcast [28] було запропоновано удосконалення архітектури ядра мережі 5G з метою підтримки багатоканальної передачі даних.

Для кожної альтернативи архітектури, запропонованої в проекті 5G-Xcast, необхідно включити багатофункціональні можливості в кілька мережевих функцій. Взагалі запропоновано три різних види додаткових функцій для багатоканальної передачі даних: ML-CP – додаткова функціональність в контрольній площині; ML-UP – додаткова функціональність в площині даних; ML-MW – функція проміжного програмного забезпечення багатоканальної передачі даних. Архітектура з зображеними потоками даних описує цей процес (рис. 3.15).

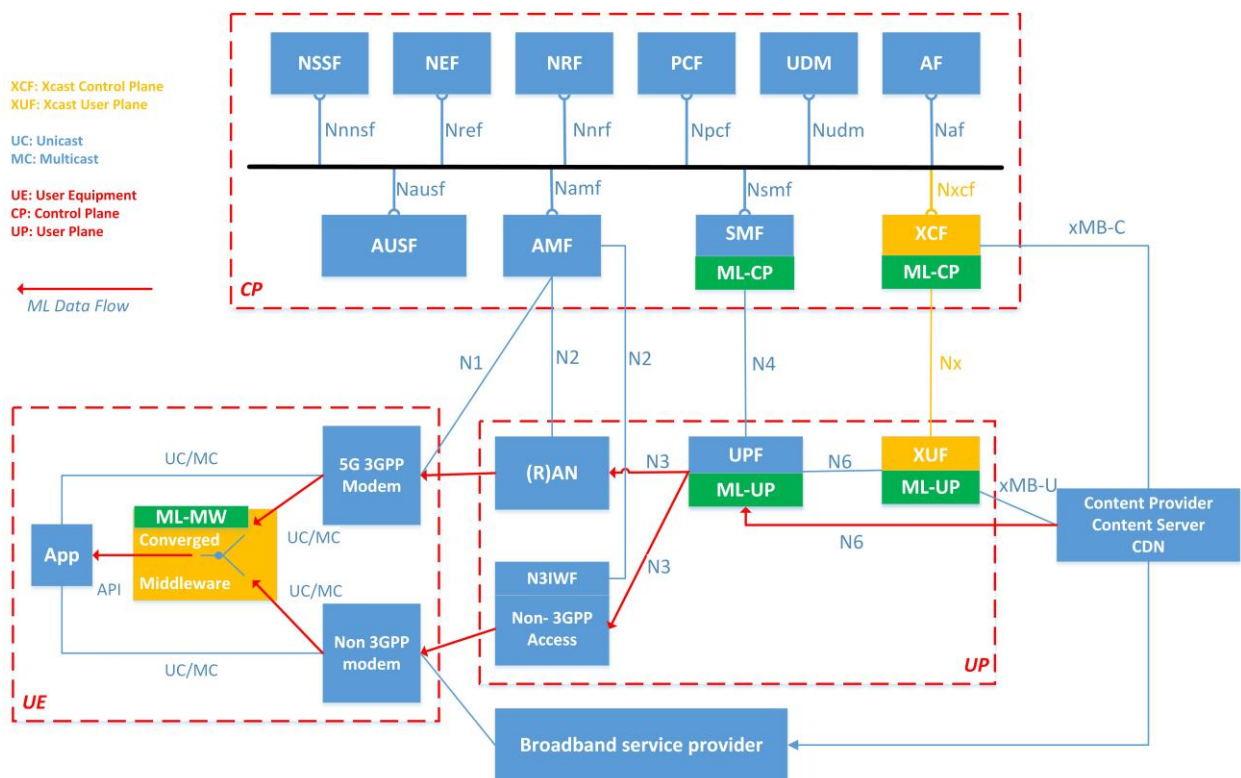


Рис. 3.15. Процес багатоканальної передачі даних в удосконаленій мережевій архітектурі 5G

До мережевих функцій мережі 5G (рис. 3.17) необхідно додати наступний функціонал.

XCF:

- налаштування та відтворення сеансу Multilink;
- оцінка параметрів QoS для передачі даних через кожну наявну мережу.

UPF:

- розділення даних;

- створення IP-тунелів.

SMF:

- налаштування та роз'єднання сесії Multilink.

Converged middleware:

- об'єднання даних;
- запит налаштування сесії ML (параметри QoS);
- сигналізація (передача даних про якість каналу);
- кешування.

Процес передачі даних наступний. Існує один загальний потік даних, наприклад, із сервера контенту, який передається на UPF через інтерфейс N6. UPF розбиває потоки даних між (R)AN та доступом до не-3GPP мереж. Після отримання в проміжному програмному забезпеченні на стороні клієнта розбиті дані об'єднуються в один загальний потік. Протокольна взаємодія під час такої багатоканальної передачі даних в мережах 3GPP та не-3GPP зображена на рис. (3.16) [29].

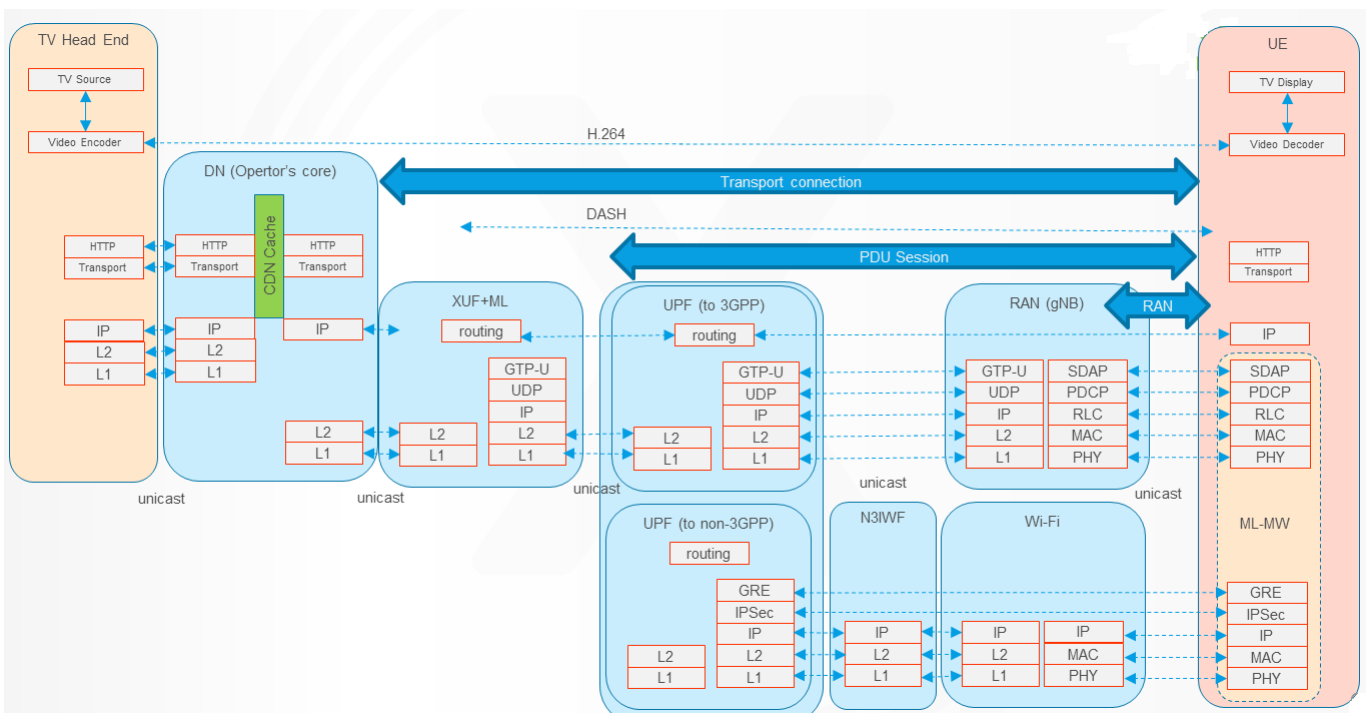


Рис. 3.16. Протокольна взаємодія під час багатоканальної передачі даних в мережах 3GPP та не-3GPP

В цій архітектурі для багатоканальної передачі передбачено встановлення декількох IP-тунелів з використанням протоколу MLPPP [30], MPTCP [31] або MPQUIC [32].

Розроблені процедури встановлення з'єднань для різних архітектур наведено у додатку Е.

Висновки до розділу 3

Даний розділ був присвячений удосконаленню радіопідмережі операторів стільникового зв'язку. В ході проведеного дослідження були отримані наступні результати.

1. Було проаналізовано архітектуру сучасних базових станцій, визначено їх основні складові та їхні функції. Було виділено спільні риси БС різних поколінь мобільного зв'язку. Проведено аналіз структур GSM, UMTS та LTE. Визначено яку роль у цих структурах відіграють BTS, NodeB та eNodeB відповідно. Виділені головні відмінності в функціях БС різних стандартів. Проаналізовані основні сучасні методи фізичної реалізації БС мобільного оператора. Пояснено, в чому відмінності в реалізаціях БС з підключеннями «feederline» та «feederless». Проаналізовано, які переваги має побудова БС на основі «feederless».

2. На основі аналізу архітектури базових станцій, проведеного у попередньому розділі можна визначити, які саме недоліки мають сучасні БС, та з якими проблемами стикаються мобільні оператори при їх встановленні та обслуговуванні.

3. Були розглянуті параметри, які впливають на якість з'єднання МС з БС та було виявлено, які з параметрів покращуються при використанні оптимізованого підходу до побудови БС.

4. Отримано залежність рівня прийнятого сигналу від відстані при використанні технології UMTS-2100. Показано, що при застосуванні оптимізованої БС рівень прийнятого мобільною станцією сигналу значно вище.

Обчислена відстань на якій може відбуватися зв'язок БС із МС для трьох підходів до побудови МС.

5. Розроблено метод оптимізації базових станцій, який спрямований на виправлення знайдених недоліків. Запропонований метод полягає в використанні технології програмно-конфігурованої радіопідсистеми для зменшення габаритів та спрощення головних процесорних модулів; використання активних антен з вбудованими радіомодулями для зменшення затухання в фідерах; використання мультистандартних антен для можливості збільшення висоти підвісу антен нових стандартів; використання електричних азимутів для більш гнучкого планування та оптимізації мережі радіодоступу. Розроблений метод значно спрощує архітектуру БС і зменшує кількість необхідного обладнання.

6. Також в даному розділі було удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі стандарту не-3GPP шляхом використання нових алгоритмів вибору мережі для передачі даних, використання комбінацій протоколів МТСП, ТСП, SCTP на різних ділянках мережі та в залежності від типу надаваних послуг.

Запропоновані удосконалення дозволяють зменшити навантаження на радіоінтерфейс мережі стільникового зв'язку до допустимого рівня, вдвічі збільшити кількість активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечити балансування навантаження в радіопідмережі.

7. Основні положення отримані в даному розділі, опубліковані в [1, 2, 6, 24, 25, 28, 29, 33-37].

Список використаних джерел у третьому розділі

1. Odarchenko R. Mobile operators base station subsystem optimization method/ R. Odarchenko, N. Dyka, O. Poligenko, L.Kharlai, A. Abakumova // Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 10-13, 2017. – P. 29-33.

2. Одарченко Р.С. Оцінка імовірності бітової помилки та пропускну здатності каналів антенних МІМО-систем. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. Вип. 2. С. 57-67.
3. Лахно В. И. Метод рабочих характеристик в оценке перспективной лазерно-компьютерной авионики. *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. 2003. № 4. С. 66–69. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2003_4_15
4. SDR Radio: веб-сайт. URL: <https://www.sdr-radio.com/>
5. Remote Radio Unit Description RRUS 11 and RRUS 61 111/1551-LZA 701 6001 Uen F | 2012-02-07
6. Одарченко Р.С. Метод оптимізації підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. № 4(56). С. 1-10.
7. Башилов Г. Восхождение к частотам. Журнал сетевых решений/Телеком. 2011. № 03.
8. Software Defined Radio: веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Software_Defined_Radio.
9. Киви Б. Год Радио. Берд Киви. *Мир ПК*. 2012. № 12.
10. Радиорелейная система PPC-1000-CPRI: веб-сайт. URL: <http://dokltd.ru/products/a20035>.
11. Active antenna: веб-сайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Active_antenna.
12. Логинов Н.А. Актуальные вопросы радиоконтроля в Российской Федерации. Москва: Радио и связь, 2000. 240 с.
13. Справочник по радиоконтролю. МСЭ. 1995.
14. Medeisis A. Fine tuning of the Okumura-Hata propagation prediction model using the minimum squares method and fuzzy logic approach/ A. Medeisis // Proceedings of the 15 th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC 2000. P. 619-623.

15. Высокочастотный коаксиальный фидер 7/8": веб-сайт. URL: http://www.selteq.com/tablename/sq_product_item/id/92.
16. Высокочастотный коаксиальный фидер 1/2": веб-сайт. URL: http://www.selteq.com/tablename/sq_product_item/id/97.
17. Модифицированная модель Хата: веб-сайт. URL: <http://systemseti.com/ССРО/409.html>.
18. 50 лучших приложений для Android: веб-сайт. URL: https://blog.allo.ua/50-luchshih-prilozhenij-dlya-android_2016-03-12/
19. “3GPP TR 23.793 - Study on Access Traffic Steering, Switching and Splitting support; In the 5G system architecture (Release 15)”: веб-сайт. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3254>
20. Claudio Rosa and others. Dual connectivity for LTE small cell evolution: Functionality and performance aspect. *IEEE Communications Magazine*. №54(6). P. 137-143.
21. Revised WID: LTE-WLAN Radio Level Integration and Interworking Enhancement. Intel 3GPP RAN Plenary. Sitges Spain, 2015. №70.
22. New Work Item on Enhanced LWA. Intel Qualcomm China Telecom 3GPP RAN Plenary . Göteborg. Sweden, 2016. №71
23. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE-WLAN Aggregation Adaptation Protocol (LWAAP) Specification. URL: www.3gpp.org.
24. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Стецюра Ю.І. Розвантаження радіоінтерфейсу мережі lte шляхом застосування концепції Hotspot 2.0 *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. Житомир: ЖВІ ДУТ. 2014. Вип.17. С.63-70.
25. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П. Використання концепції мереж SDN для розподілу трафіку між мережами LTE та Wi-Fi. *Наукоємні технології*. 2014. Вип.4 (24). С.432-437.
26. TS 23.501 “System Architecture for the 5G System”

27. TS 23.502 “Procedures for the 5G System”

28. 5G-Xcast WP4 D4.1 “Mobile Core Network”

29. Roman Odarchenko, Baruch Altman, Rui Aguiar and Yevgeniya Sulema. Mul-tilink Approach for the Content Delivery in 5G Networks: Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. P.140-144.

30. Anwaar Ali ; Junaid Qadir ; Arjuna Sathiaselan ; Kok-Lim Alvin Yau ; Jon Crowcroft. MP-ALM: Exploring Reliable Multipath Multicast Streaming with Multipath TCP: Proceedings of the 41st Conference on Local Computer Networks (LCN): Dubai, United Arab Emirates 7-10 Nov. 2016. P. 138-146. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7796772>

31. MPTCP: веб-сайт. URL:

<http://www.jzus.zju.edu.cn/oldversion/opentxt.php?doi=10.1631/jzus.C14000524>

32. Multipath Extension for QUIC draft-deconinck-multipath-quic-00: веб-сайт. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-deconinck-multipath-quic-00>

33. Одарченко Р.С. Методика вибору телекомунікаційних послуг мереж LTE. *Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики*: зб. матеріалів доп.учасн. II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та молодих учених, 23-24 жовтня 2013 р. Київ, 2013. –С. 56.

34. Одарченко Р.С. Варіанти оптимізації мережі LTE. *Проблеми навігації та управління рухом розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: зб. матеріалів доп.учасн. Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 21-23 листопада 2014 р. Київ, 2014. С. 156.

35. Одарченко Р.С. Дослідження структури мережі LTE та можливостей її оптимізації. *Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації*: зб. наук. праць науково-практичної конференції, 25-28 лютого 2015 р. Київ, 2015.–С. 80-82.

36. Одарченко Р.С. Оцінка адекватності моделей розповсюдження для їх використання під час визначення місцезнаходження абонентів. *Наукоємні технології*. 2015. Вип. 2 (26). С. 159-165.

37. Одарченко Р.С. Варіанти оптимізації підсистеми базових станцій. *Проблеми навігації та управління рухом розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: зб. матеріалів доп.учасн. Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 21-23 листопада 2016 р.:Київ, 2016. С. 44.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА

В сучасних стільникових мережах є потреба у використанні більш ефективних методів керування потоками трафіку, що враховували б різномірність трафіку не тільки в підсистемі базових станцій, а звичайно і в транспортній мережі. Водночас, в оператора повинні бути засоби управління потоками, що дозволяли б гарантувати певний рівень якості послуг для кожного окремого абонента, який отримує індивідуальний інформаційний потік. Розподілення навантаження підвищує інтенсивність використання мережевих сегментів, а значить і ефективну пропускну здатність мережі в цілому. Основною складністю у вирішенні поставленої задачі є те, що при умові різної вартості маршрутів складно досягнути оптимального виконання вимог стосовно якості обслуговування.

Також потрібно пам'ятати, що транспортна мережа представляє собою складний розподілений об'єкт, передбачити поведінку якого в наступний момент часу не є можливим. У більшості випадків гарантована якість обслуговування може бути забезпечена тільки при виділенні віртуального каналу, який передбачає наявність одного маршруту з показниками продуктивності, які вимагаються. В подібних умовах виникають ситуації, коли альтернативні маршрути будуть недовантажені, а забезпечити рівномірне завантаження мережі можливо буде лише пакетами, які не будуть чутливі до параметрів якості обслуговування.

Тому метою даного розділу є розробка удосконалення транспортної мережі стільникового оператора з метою підвищення ефективності її функціонування та рівня захищеності. Для досягнення цієї мети було удосконалено модель транспортної мережі стільникового оператора; проведено її оптимізацію; удосконалено метод маршрутизації із резервуванням ресурсів та одночасним балансуванням навантаження із врахуванням різних параметрів якості обслуговування абонентів та захищеності в транспортній мережі.

4.1 Транспортна мережа LTE

Архітектура мережі LTE розроблена таким чином, щоб забезпечити підтримку пакетного трафіку з так званою «безшовною» (seamless) мобільністю, мінімальними затримками доставки пакетів і високими показниками якості обслуговування. Вона представлена на рис. 4.1 [1].

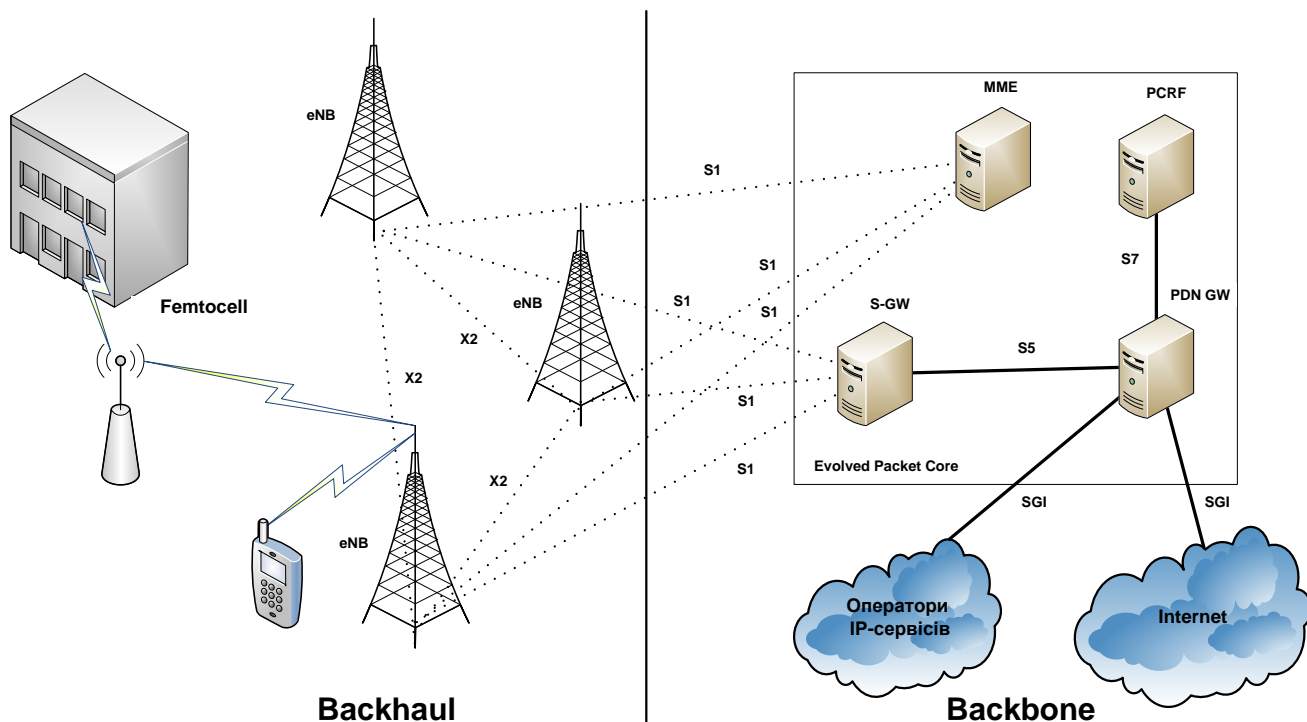


Рис. 4.1. Транспортна мережа LTE

Як вже зазначалось, для належної підтримки нових широкосмугових технологій радіодоступу в транспортних мережах повинна бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та підвищенні рівня якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку. Класична транспортна мережа оператора стільникового зв'язку складається з двох основних сегментів:

- розподілена мережа (backhaul), що зв'язує базові станції з контролерами і центрами комутації рухомого зв'язку;
- магістральна мережа (backbone), що забезпечує високошвидкісний транспорт між центрами комутації.

До основних критеріїв для оцінки транспортної мережі можливо віднести наступні [2]:

- пропускна здатність каналу зв'язку – критерій, що визначає максимальну пропускну здатність каналу зв'язку, яка може бути досягнута при використанні тієї чи іншої технології;

- максимальна довжина транспортної ділянки – критерій, який використовується виключно для оцінки технологій побудови транспортних мереж і визначає максимальну (відповідно до стандарту або рекомендації) відстань, на яку може бути організований канал зв'язку з використанням тієї чи іншої технології;

- час відновлення зв'язку – критерій, що визначає орієнтовний час відновлення зв'язку (оновлюється можливість передачі корисної інформації) на ділянці мережі, побудованій з використанням тієї або іншої технології, після відновлення фізичного каналу;

- можливість управління навантаженням – критерій, який відображає підтримку тієї або іншою технологією механізмів управління навантаженням в мережі (гнучкість маршрутизації, підтримка динамічної реконфігурації тощо);

- підтримка резервування – критерій, який відображає підтримку технологіями механізмів резервування каналів зв'язку (можливість перемикання в автоматичному режимі на резервний канал у випадку виходу з ладу основного). Резервування мережі підвищує надійність, що в умовах магістральних мереж є досить вагомим критерієм;

- доступність обладнання – критерій, що відображає наявність (або відсутність) досить великої кількості альтернативних рішень устаткування, яке може бути використане для будівництва транспортної мережі з використанням тієї чи іншої технології;

- доступність фахівців – критерій, що відображає наявність (або відсутність) достатньої кількості фахівців на місцевому ринку праці, які можуть бути задіяні для будівництва, розвитку та поточного обслуговування обладнання тієї чи іншої технології побудови транспортної мережі оператора;

- сумісність обладнання різних виробників – критерій, що відображає можливість використання обладнання, необхідного для побудови транспортної мережі за допомогою тієї чи іншої технології, виробленого різними виробниками.

Критерії можливо об'єднати у наступні фактори.

- Ефективність – є важливим параметром транспортної мережі, що відображає якісні характеристики мережі, можливість найкращого надання послуг своїм абонентам. До критеріїв відносяться: пропускна здатність, маршрутизація, управління навантаженням, довжина лінії.

- Надійність – є найважливішим параметром для оцінки магістральної мережі, адже не важливо наскільки ефективною є мережа якщо вона не працює. Тому забезпечення постійного надання послуг та швидкого відновлення зв'язку є більш важливим, ніж параметри ємкості та швидкості. До критеріїв відносяться: час відновлення, можливість резервування, інтенсивність відмов, час напрацювання на відмову.

- Вартість – є вагомим критерієм для побудови локальних мереж, але для магістральних мереж кінцева вартість не є найважливішим параметром, для якості мережі важливішою є якість обслуговування абонентів. До критеріїв відносяться: доступність спеціалістів, вартість системи, вартість доставки 1 біта інформації, сумісність обладнання.

4.2. Методика вибору оптимальної технології транспортної мережі

Для визначення можливостей впровадження стільникових мереж нових поколінь було проведено аналіз існуючих технологій транспортних мереж. Для цього було запропоновано математичний апарат для проведення оцінки існуючих технологій транспортних мереж, та вибору оптимальної технології за допомогою експертних оцінок провідних фахівців.

Для визначення кращих систем було розроблено методику порівняльної оцінки мереж, на основі якої є можливим здійснення вибору оптимальної транспортної мережі.

Серед основних критеріїв для оцінки транспортної мережі було віднесено наступні: пропускна здатність каналу зв'язку; максимальна довжина транспортного ділянки; час відновлення; можливість управління навантаженням; підтримка резервування; доступність обладнання; доступність фахівців; сумісність обладнання різних виробників.

Для оцінки технологій критерії були об'єднані у наступні фактори: ефективність; надійність; вартість.

Використовуючи метод попарного порівняння елементів ієрархії, було побудовано матриці парних порівнянь для ієрархії, що відбиває основні переваги системи передачі. Для кожної матриці розрахуємо нормований вектор пріоритетів (E), власне число матриці (λ_{max}) і відношення узгодженості (CI). Розрахунок виглядає наступним чином – функція `eigenvals` (D) обчислює власний значення квадратної матриці D .

Розрахунок нормованого вектора пріоритетів проводиться за наступним алгоритмом.

- 1) Перемножуються елементи кожного рядка, отриманий результат записується в стовпець.
- 2) Береться корінь n -го ступеня з кожного елемента знайденого елемента (n – порядок матриці).
- 3) Складаються елементи стовпця.
- 4) Кожен з елементів стовпця ділиться на отриману суму.

Елементи завдання порівнюються попарно по відношенню до їх впливу («вазі», або «інтенсивності») на загальну для них характеристику. Порівнюючи набір складових проблеми один з одним, отримуємо квадратну матрицю виду:

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	$W1/W1$	$W1/W2$	$W1/W3$	$W1/W4$
A_2	$W2/W1$	$W2/W2$	$W2/W3$	$W2/W4$
A_3	$W3/W1$	$W3/W2$	$W3/W3$	$W3/W4$
A_4	$W4/W1$	$W4/W2$	$W4/W3$	$W4/W4$

	A₁	A₂	A₃	A₄
A₁	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄
A₂	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₄
A₃	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	A ₃₄
A₄	A ₄₁	A ₄₂	A ₄₃	A ₄₄

Ця матриця має властивість зворотної симетричності, тобто:

$$a_{ij} = 1/a_{ji},$$

де індекси i та j відносяться до рядку і стовпця відповідно; $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ – множина з n елементів, $w_1, w_2, w_3, \dots w_n$ – відповідно їх вага і інтенсивність.

Далі, з метою визначення вектора пріоритету альтернатив щодо факторів і фокуса ієрархії було здійснено ієрархічний синтез.

Вектор пріоритетів альтернатив щодо фактора «Ефективність» визначається шляхом перемноження матриці, сформованої із значень векторів пріоритетів («Пропускна здатність», «Довжина лінії», «Управління навантаженням», «Маршрутизація») на вектор, що визначає значимість критеріїв якості, розташованих під фактором «Ефективність». Аналогічно визначають вектори пріоритетів альтернатив щодо факторів «Надійність» і «Вартість». Результати розрахунку для технологій OTN, DWDM та MPLS зображено на рис. 4.2.

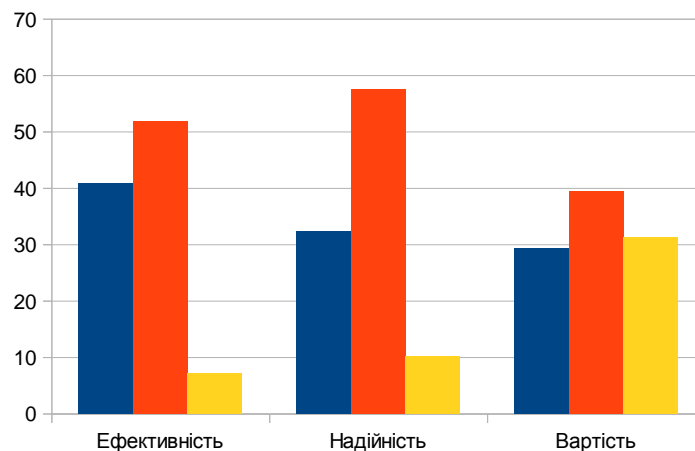


Рис. 4.2. Визначення вектора пріоритету альтернатив щодо факторів

Загальний вектор пріоритетів альтернатив має вигляд:

$$W = \begin{pmatrix} 0,409 & 0,324 & 0,294 \\ 0,519 & 0,575 & 0,395 \\ 0,072 & 0,101 & 0,312 \end{pmatrix} E_{factor} = \begin{pmatrix} 0,342 \\ 0,577 \\ 0,081 \end{pmatrix} W_{general} = \begin{pmatrix} 0,35 \\ 0,541 \\ 0,108 \end{pmatrix}$$

Графічно можна відобразити діаграму розподілу вибору систем передачі за допомогою запропонованої методики (рис. 4.3).

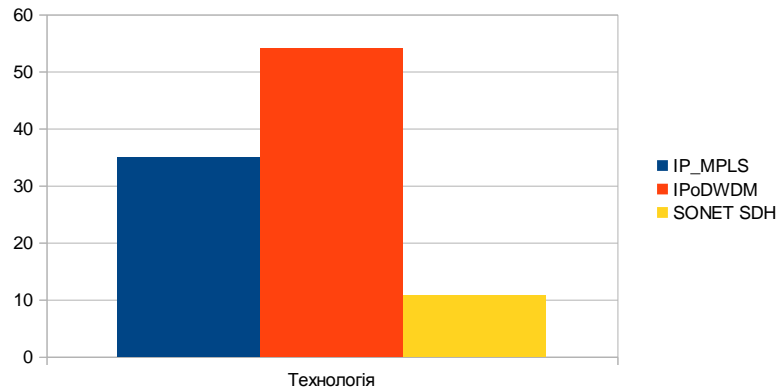


Рис.4.3. Діаграми вибору технології мережі

Також можна зобразити ієрархічну структуру проблеми вибору системи, та показати розподіл важливості критеріїв (рис. 4.4).

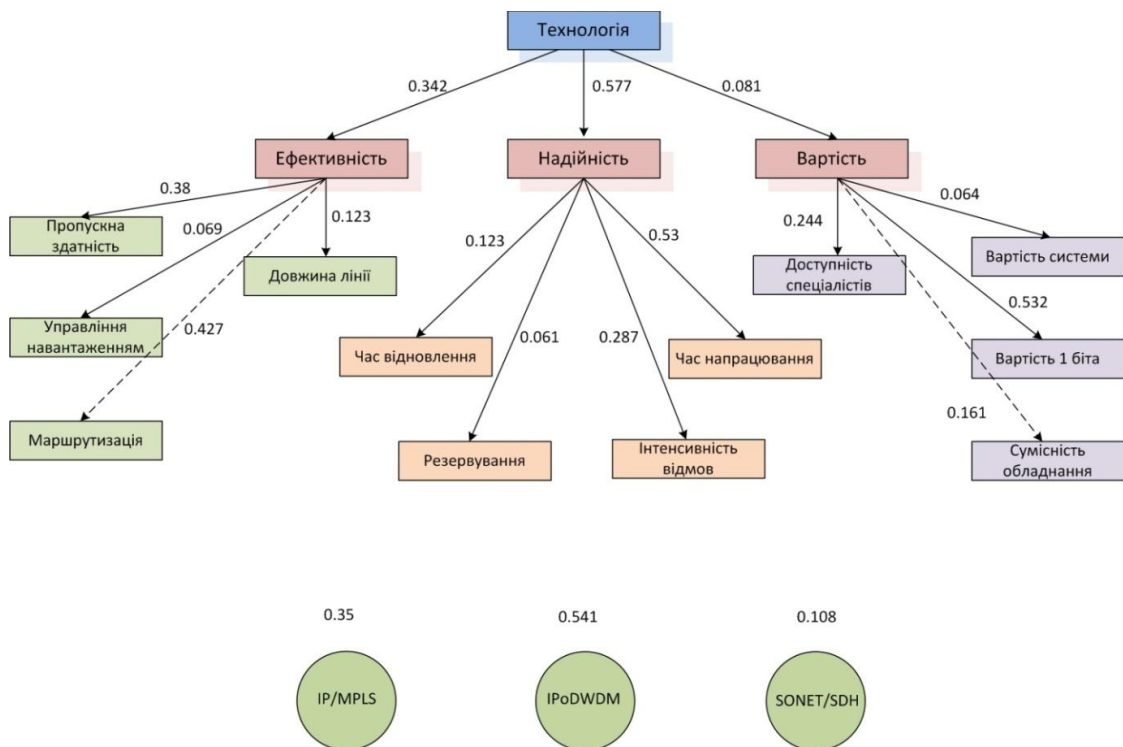


Рис.4.4. Ієрархія проблеми вибору технології транспортної мережі

Таким чином, можна зробити висновок, що за розробленою методикою, вибраними локальними пріоритетами, серед досліджуваних систем найкращою є мережа на базі технології IPoDWDM $\max(W_{general}) = 54,128\%$. Хоча, як можна бачити з отриманих оцінок, технологія IP MPLS лише трохи поступається їй. А технологія SONET SDH вже значно відстає, і це свідчить про те, що остання технологія вже досить застаріла і не може задовольнити всіх потреб користувачів телекомунікаційних ресурсів.

4.3. Метод оптимізації багатошарової структури мережі

4.3.1. Модель оптимізації транспортної мережі оператора стільникового зв'язку

Сучасна типова архітектура транспортної мережі стільникового оператора має трьохшарову структуру: мережа радіорелейних станцій (надалі – PPC) [3], оптична транспортна мережа (OTN) [4] та мережа з ущільненим хвильовим мультиплексуванням DWDM (рис. 4.5).

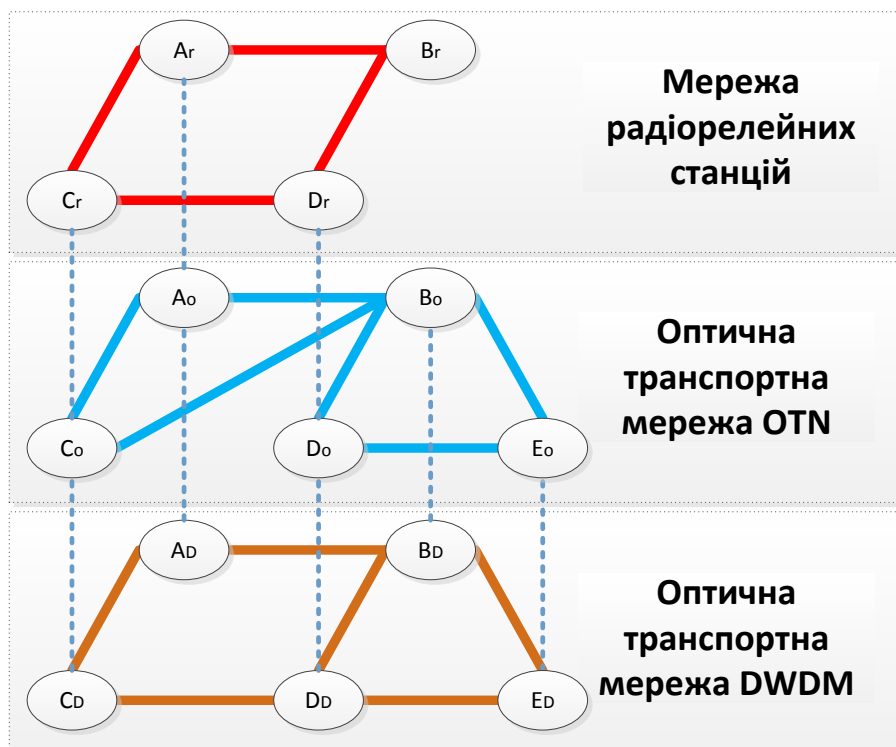


Рис. 4.5. Багатошарова транспортна мережа PPC/OTN/DWDM

Метод оптимізації такої багатошарової структури мережі наступний.

Етап 1 – Побудова топології мережі радіорелейних станцій. Для вибору оптимальної топології скористаємось наступною математичною моделлю [5].

Сумарна швидкість інформаційних потоків від БС визначається як:

$$R_{BC} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k R(i, j), \quad (4.1)$$

де R_{BC} - загальна швидкість потоків від всіх БС; $R(i,j)$ - швидкість j -го потоку від i -ої БС; k - загальна кількість потоків, переданих БС; n - загальна кількість БС.

Слід відзначити, що загальна швидкість потоків від БС R_{BC} є значенням, яке не має перевищувати пропускну здатність між РРС та ядром мережі, як відображено на топологічній схемі обміну даними між БС та ядром мережі (рис. 4.6) [5].

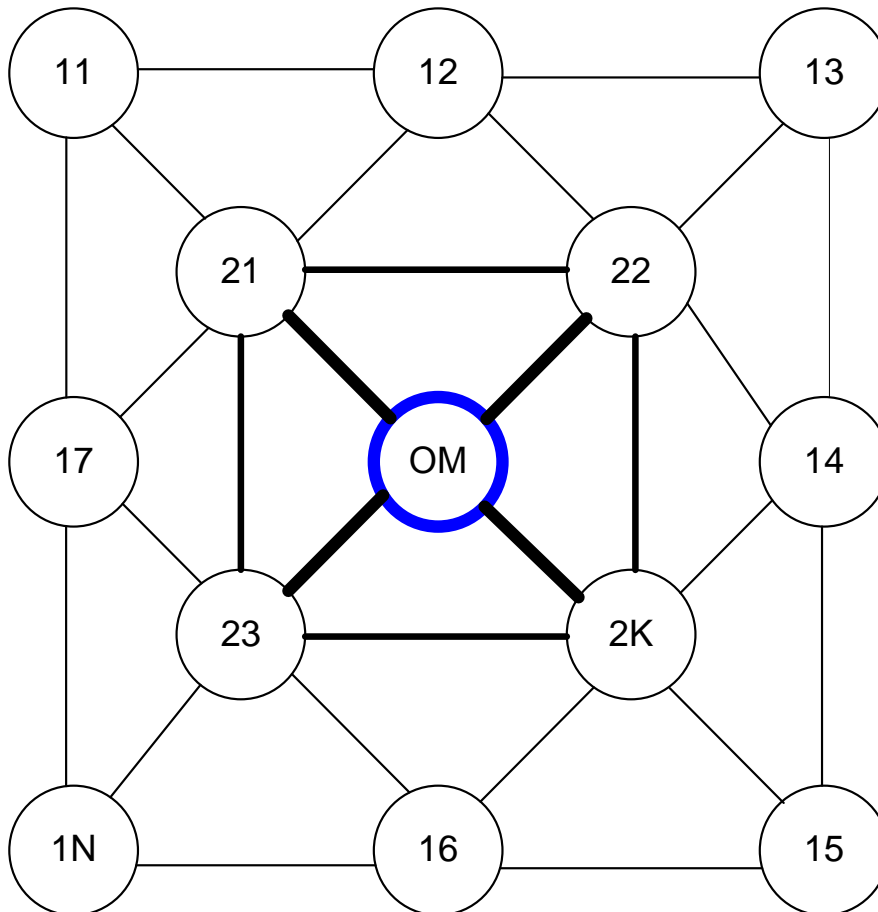


Рис.4.6. Комірчаста топологія мережі (вершини графу – РРС, підключені до БС)

На рис. 4.6: вершини графу 11, 12, ...1N – РРС на краю мережі; 21, 22,...2K – проміжні радіорелейні станції на шляху до оптичної мережі;

ОМ – оптична мережа. Слід відмітити, що рівнів проміжних станцій може бути декілька, проте тут наведено лише один.

Для вирішення поставленого завдання приймемо, що топологія мережі – комірчаста, введемо декілька умов завантаженості мережі:

- трафік між кінцевими РРС та координуючими є постійним (нормальне навантаження);

- трафік між кінцевими та проміжними є змінним (плаваюче навантаження).

В якості метрики під час обрання оптимальної топології мережі РРС обрано пропускну здатність каналу між парою РРС.

Крок 1. На першому кроці роботи даного етапу необхідно встановити всі можливі топологічні зв'язки між вузлами мережі. Для цього необхідна інформація про місцезнаходження БС (координати GPS).

Крок 2. Проведення розрахунку пропускну здатності каналів між кожною парою вузлів групи БС. Для цього використовується наступна модель.

Для такої конфігурації антенних систем швидкості передавання даних по мережі розраховуються за формулою для кожного окремого каналу:

$$R = 10^{10} \cdot \frac{1}{k \cdot T}, \quad (4.2)$$

де $P = P_{npd} - (E_b/N_0)_{dB} + G_{npd} + G_{nrm} - L - L_{мет.ум}$

В останній формулі (4.2) позначення подібні до (2.1).

Необхідне співвідношення сигнал/шум $(E_b/N_0)_{dB}$ для забезпечення необхідного рівня бітової помилки обирається в залежності від типу методу модуляції, який є можливість використати.

Крок 3. На цьому кроці відбувається визначення оптимальних маршрутів (топологічних зв'язків). Для вирішення завдання при нормальному навантаженні розділемо мережу на сегменти обміну даними за умов, що навантаження між проміжними РРС та оптичною мережею не перевищує максимальну пропускну здатність каналу, тобто $C_{2K,OM} \geq \sum C_{1V,2K} + \sum C_{2K,2Z}$, де

$C_{IV,2K}$ – пропускна здатність від PPC на краю мережі до проміжної PPC, V – номери крайніх PPC, які мають сполучення із проміжною PPC $2K$; $C_{2K,2Z}$ – пропускна здатність між $2K$ -ою проміжною PPC та оптичною мережею, V – номери проміжних PPC, які мають сполучення із проміжною PPC $2K$.

Відповідно до алгоритму Дейкстри отримаємо найкоротші маршрути для всіх вершин графу. При цьому, в разі перевищення максимальної пропускної здатності між проміжною радіорелейною станцією та оптичною мережею, необхідно шукати інший менш навантажений маршрут.

Етап 2 – Оптимізація пропускної здатності. Далі в рамках розробленого методу використовується інтегрована модель оптимізації пропускної здатності для планування трирівневої мережі з урахуванням технологічних обмежень OTN рівня. Вона характеризується тим, що кожен верхній шар накладає певні обмеження по пропускній здатності каналів кожного нижчого рівня (рис. 4.7) [6].

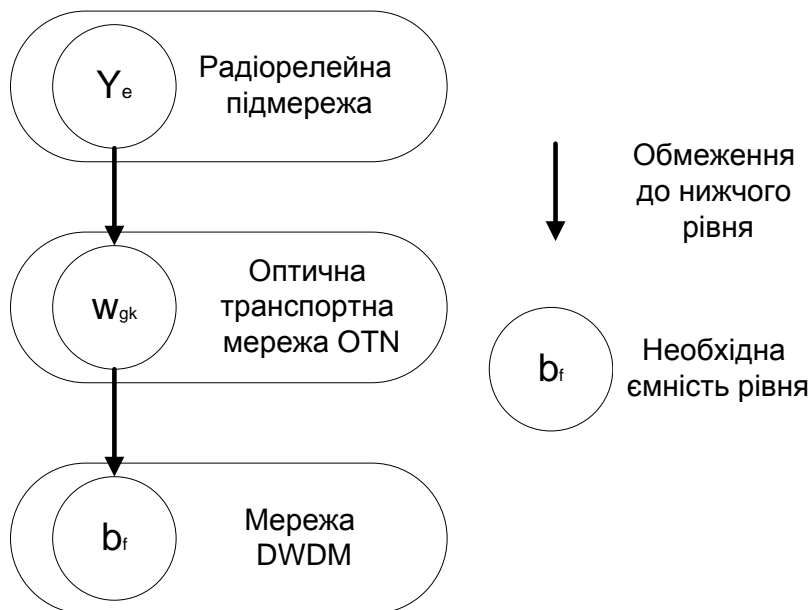


Рис. 4.7. Підхід до розрахунку багатoshарової моделі транспортної мережі PPC/OTN/DWDM

Запропоновані моделі оптимізації мережі PPC/OTN/DWDM спрямовані на мінімізацію вартості мережі (Модель 1) та зведення до мінімуму загальної пропускної здатності на радіорелейних станціях (PPC) і OXCs (Optical Cross-

Connect) (Модель 2) [6]. Модель спрямована на оптимізацію пропускну здатності PPC і OXCс, а не на пропускну здатність каналу зв'язку на кожному мережевому рівні.

Модель 1:

$$\sum_{p=1}^{P_d} x_{dp} = 1;$$

$$\sum_{d=1}^D h_D \cdot \sum_{p=1}^{P_D} \delta_{edp} \cdot x_{dp} \leq M \cdot y_e;$$

$$\sum_{q=1}^{Q_e} m_{eq} = y_e;$$

$$M \cdot \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \gamma_{qeq} \leq \sum_{k=0}^W U_k \cdot \omega_{gk};$$

$$\sum_{z=1}^{Z_g} s_{gkz} = \omega_{gk};$$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^W U_k \cdot \sum_{z=1}^{z_g} \mathcal{G}_{fgz} \cdot s_{gkz} \leq N \cdot b_f;$$

$$\text{Cost}_1 = \sum_{e=1}^E \eta_e \cdot y_e + \sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^W \beta_{gk} \cdot \omega_{gk} +$$

$$+ \sum_{f=1}^F \xi_f \cdot b_f \rightarrow \min;$$

Модель 2:

$$\sum_{p=1}^{P_d} x_{dp} = 1;$$

$$\sum_{d=1}^D h_D \cdot \sum_{p=1}^{P_D} \delta_{edp} \cdot x_{dp} \leq M \cdot y_e;$$

$$\sum_{e=1}^E \theta_{ve} \cdot M \cdot y_e \leq A \cdot Y_v^l;$$

$$\sum_{q=1}^{Q_e} m_{eq} = y_e;$$

$$M \cdot \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \gamma_{qeq} \leq \sum_{k=0}^4 U_k \cdot \omega_{gk};$$

$$\sum_{k=0}^4 \phi_{rg} \cdot U_k \cdot \omega_{gk} \leq C \cdot Y_r^0;$$

$$\sum_{z=1}^{Z_g} s_{gkz} = \omega_{gk};$$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^W U_k \cdot \sum_{z=1}^{z_g} \mathcal{G}_{fgz} \cdot s_{gkz} \leq N \cdot b_f;$$

$$\text{Cost}_2 = \sum_{v=1}^V \sigma_v \cdot Y_v^l + \sum_{r=1}^R \rho_r \cdot Y_r^0 \rightarrow \min;$$

де x_{dp} – змінна PPC, яка включає попит d позначений на шляху p (визначається на етапі 1 даного методу); h_D - величина необхідної пропускну здатності каналу; m_{eq} – змінна потоку OTN позначена на шляху q , що включає пропускну здатність лінії зв'язку e ; s_{gkz} – змінна потоку DWDM позначена на шляху z , що включає пропускну здатність лінії зв'язку g інтерфейсу k ; y_e – кількість модулів PPC з пропускну здатністю ствола M , що повинні бути встановленні на лінії e на рівні радіорелейних ліній; Y_v^l – пропускна здатність v -ї PPC; ω_{gk} – кількість модулів з пропускну здатністю U_k , що повинні бути встановленні на лінії g на OTN рівні; W – кількість модулів на OTN рівні з різною пропускну

здатністю; Y_r^0 – пропускна здатність r -го ОХС, b_f – кількість модулів з пропускною здатністю N на DWDM рівні; δ_{edp} – коефіцієнт, що вказує на приналежність лінії e шляху p (приймає значення “0” або “1”); γ_{geq} – коефіцієнт, що вказує на приналежність лінії g шляху q (приймає значення “0” або “1”); ϑ_{fgz} – коефіцієнт, що вказує на приналежність лінії f шляху z (приймає значення “0” або “1”); ϕ_{rg} – бінарна змінна (“1” – якщо ОХС функціонує нормально, “0” – в протилежному випадку); A – ємність РРС, C – ємність ОХС; θ_{ve} – бінарна змінна (“1” – якщо РРС функціонує нормально, “0” – в протилежному випадку).

Поставлена задача оптимізації для моделі 1 вирішується за допомогою евристичного підходу (рис. 4.8).

Даний алгоритм містить у своєму складі процедури «Резервування ємностей», «Підрахунок» та «Комбінування OTN».

Процедура «Резервування ємностей мережі» може бути представлена наступним чином (псевдокод):

Вхідні дані: h_d ,

Вихідні дані: наявність багатопарового шляху $i=1$;

until всі T_d є задоволеними **repeat**

{ **if** ємність наявна на T_d^i **then**

if один або більше $l_v(T_d^i)$ є фізичним волокном (волокнами) **then**

 {створити оптичне з'єднання, що з'єднує два кінцеві ОХС;
 створити тунельне з'єднання двох кінцевих (проміжних) РРС};

 зарезервувати h_d на кожний $l_v(T_d^i)$;

if один або більше $l_v(T_d^i)$ є OTN (оптичне з'єднання), **then**

for each OTN $l_v(T_d^i)$ **do**

if поточний U_k ($k=0,1..W$) має наявну ємність $\geq h_d$ **then**

 {зарезервувати ємність};

else

 {викликати процедуру «Підрахунок»}

 оновити пропускну здатність ліній зв'язку;

 оновити багаторівневу топологію;

повернення d задовольняється;};

else

{i++;};}

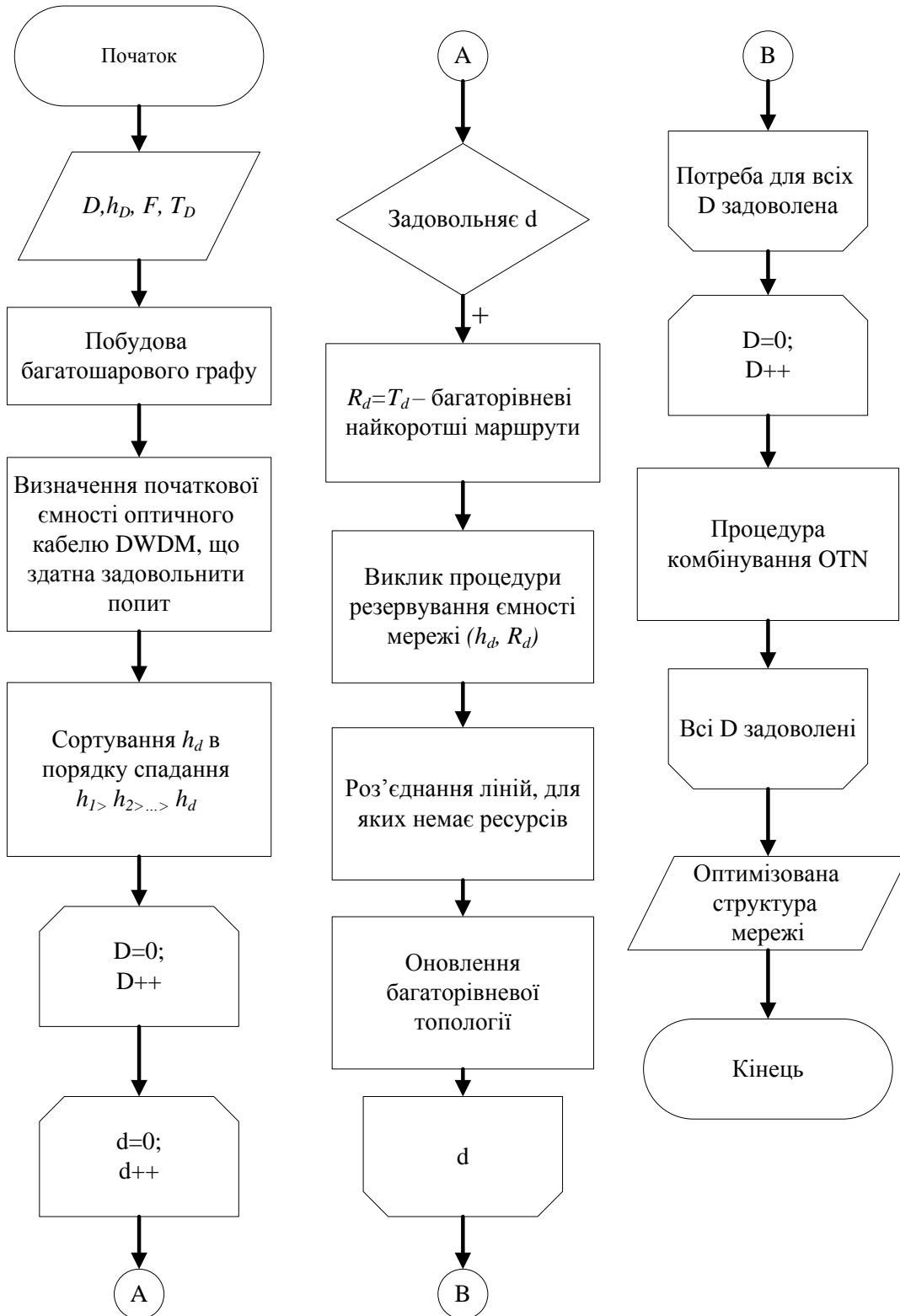


Рис. 4.8. Евристичний алгоритм вирішення поставленої задачі

В даній процедурі прийняті наступні позначення: T_d – набір багаторівневих шляхів – кандидатів на задоволення ємності d ; T_d^i – шлях-

кандидат i в таблиці маршрутизації R_d на задоволення потреби у ємності d ;
 $l_v(T_d^i)$ - канал v на шляху T_d^i .

Процедура «Підрахунок» може бути представлена в свою чергу наступним чином (псевдокод):

Вхідні дані: OTN $l_v(T_d^i), h_d, U_k^u$

Вихідні дані: типи та кількість U_{k^s} , що вимагаються

$f \leftarrow \infty$;

$x_f \leftarrow \infty$;

for $k = 0..W$

{ $x_k \leftarrow \lceil h_d / U_k \rceil \times U_k^u$;

$x_{k+1} \leftarrow \lceil h_d / U_{k+1} \rceil \times U_{k+1}^u$;

if $x_k \leq x_{k+1}$ **then**

{ $\min = k$; };

else

{ $\min = k + 1$; }

if $x_f > x_{\min}$ **then**

{ $f \leftarrow \min$;

$x_f \leftarrow \lceil h_d / U_{\min} \rceil$; };

$U_f^c \leftarrow U_f^c + x_f$;

Процедура «Комбінування OTN» може бути представлена наступним чином (псевдокод):

Вхідні дані: OTN канал l

Вихідні дані: остаточна комбінація U_{k^s} на кожному l

for $k = 0..4$

{ $nU_k \leftarrow U_k^c$; };

for $k=0..W$

{ $\text{умова} = \text{істина}$;

$tU_k \leftarrow nU_k$;

$tU_{k+1} \leftarrow nU_{k+1}$;

Поки $\text{умова} = \text{помилкова}$ **або** $tU_k = 0$ **repeat**

{**if** $(tU_k \bmod U_k^m) = 0$ **then**

{ $tU_{k+1} \leftarrow nU_{k+1} + (tU_k / U_k^m)$;

```

 $tU_k \leftarrow nU_k - tU_k;$ 
if  $nU_k \times U_k^u + nU_{k+1} \times U_{k+1}^u > (tU_k \times U_k^u + tU_{k+1} \times U_{k+1}^u)$  then
  {  $nU_k \leftarrow tU_k;$ 
     $nU_{k+1} \leftarrow tU_{k+1};$  };
else
  {  $tU_k --;$  };
for  $k = 0..W$ 
  {  $U_k^c \leftarrow nU_k;$  }.

```

Модель 2 дозволяє мінімізувати необхідну пропускну здатність на кожному вузлі маршрутизації ν і комутації r . Тобто, модель спрямована на оптимізацію пропускну здатності PPC і OXCs, а не каналу зв'язку на кожному мережевому рівні.

Таким чином, представлена розроблена модель оптимізації пропускну здатності вузла в багаторівневій мережі PPC/OTN/DWDM та результати, які показують, що збільшення мережевого навантаження впливає на пропускну здатність, і формує вимоги до пропускну здатності вузлів на різних рівнях.

4.3.2. Дослідження моделі

Надалі наведемо результати моделювання розробленого метода. У даному дослідженні було розглянуто спрощену топологію мережі з виділенням обласних центрів України (16 вузлів на кожному рівні).

В таблиці 4.1 наведено інформацію про топологію мережі та попит на її ресурси.

Таблиця 4.1

Інформація про топологію мережі та попит на її ресурси

Кількість вузлів на рівень	Кількість фізичних зв'язків	Загальне навантаження	Кількість попиту	Середнє навантаження
16	24	470	94	5

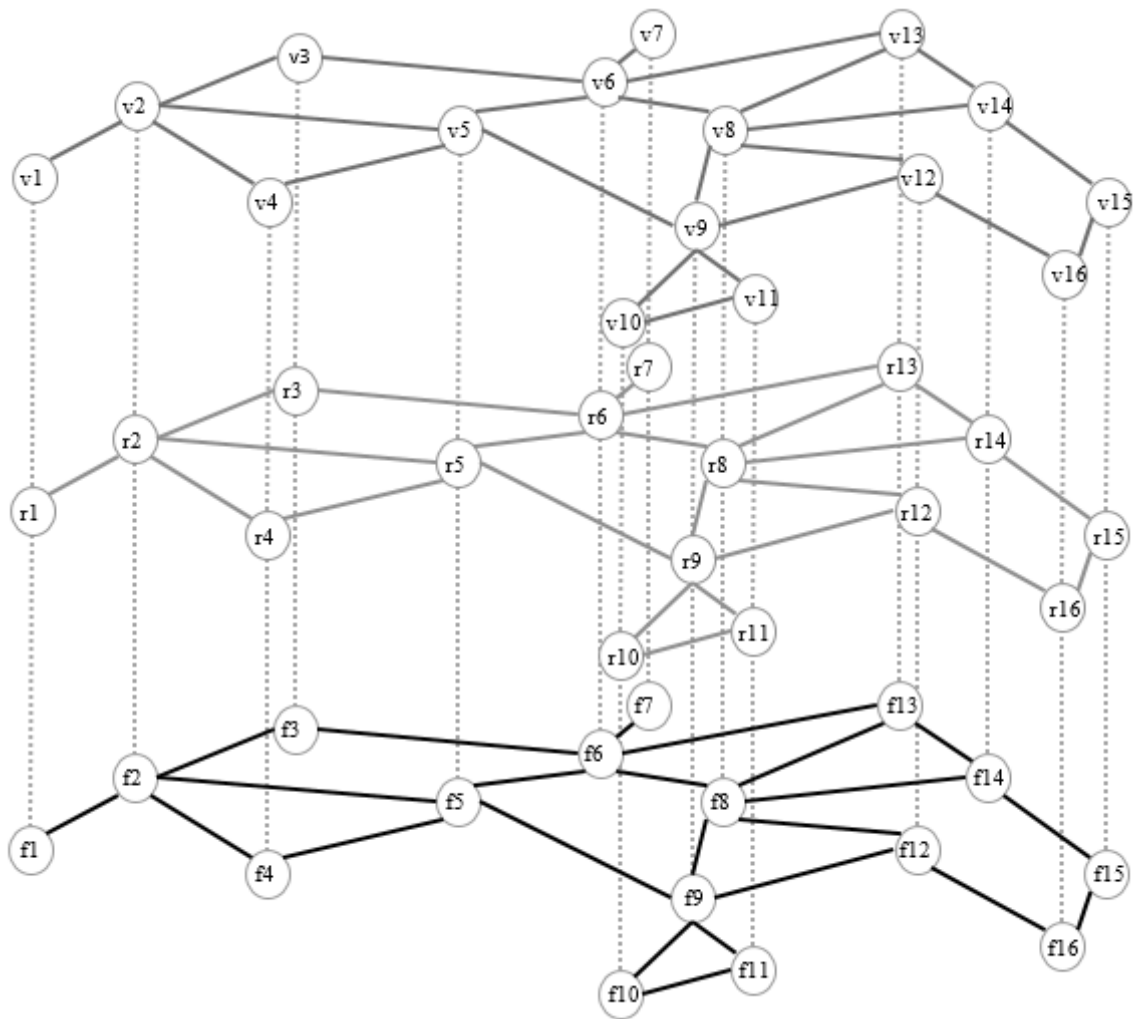


Рис.4.9. Спрощена топологія мережі з виділенням обласних центрів України

В таблиці 4.2 показано значення кожного параметра моделі, що використовуються. Ця таблиця показує, що існує всього 27 сценаріїв, враховуючи зміни вагових співвідношень, значень M і A , при фіксованому значенні C . Це дозволяє дослідити вплив від зміни цих параметрів в мережі.

Таблиця 4.2

Значення параметрів

Вагові співвідношення	M Gbps	A Gbps	C Gbps
0.5:1, 1:1, 1:0.5	2.5, 5, 10	2.5, 5, 10	10

Загальна пропускна здатність PPC та ОХС показана на рис. 4.10 та 4.11.

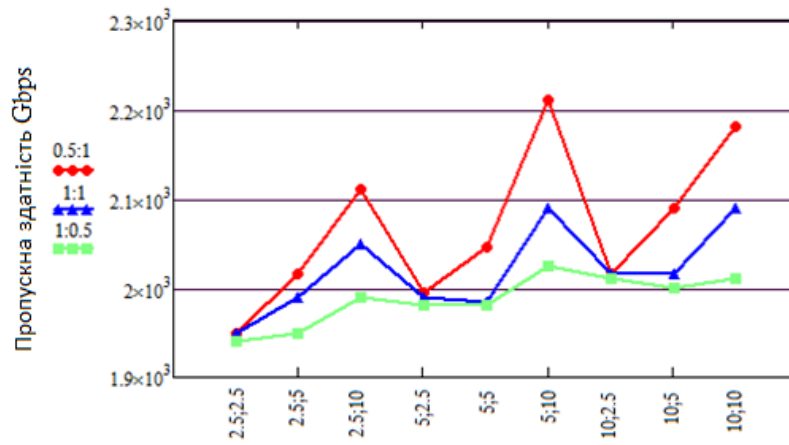


Рис.4.10. Залежність пропускної здатності РРС від різних значень M і A

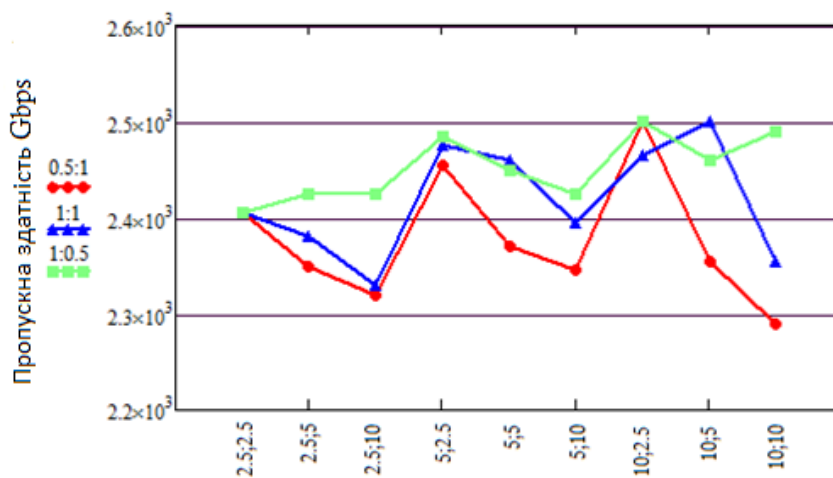


Рис. 4.11. Залежність пропускної здатності РРС від різних значень M і A

Модель дозволяє оптимізувати необхідну пропускну здатність на кожному вузлі маршрутизації v і комутації r . Тобто, модель спрямована на оптимізацію пропускної здатності РРС і ОХС, а не каналу зв'язку на кожному мережевому рівні.

Згідно значень пропускної здатності окремих вузлів, можна детально можна дослідити випадок, коли $M = 10$ і $A = 10$. Рис. 4.12 показує, що необхідна індивідуальна пропускну здатність кожної РРС v зазвичай нижче при ваговому співвідношенні 1:0.5. Це відбувається, оскільки при цьому ваговому співвідношенні дорожче мати пропускну здатність РРС, ніж пропускну здатність ОХС. Крім того, можна помітити, що вагове співвідношення 0.5:1, як правило, призводить до більшої індивідуальної пропускної здатності РРС, так як дане вагове співвідношення визначає менше ваги до вузла РРС.

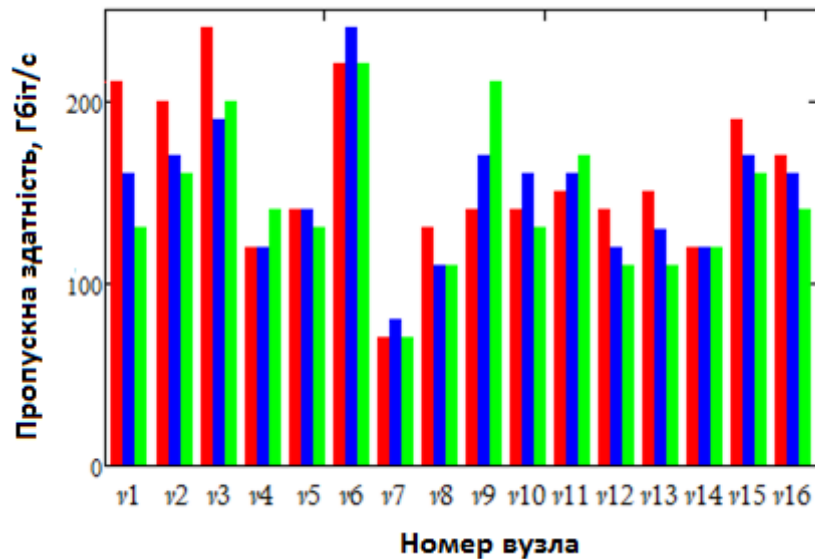


Рис.4.12. Індивідуальна пропускна здатність PPC при значеннях $M = 10$, $A = 10$ і $C = 10$

Можна спостерігати протилежну поведінку пропускної здатності кожного вузла ОХС на рис. 4.13. У цьому випадку необхідна індивідуальна пропускна здатність кожного ОХС r , як правило, найнижча при ваговому співвідношенні 0.5:1, так як це вагове співвідношення вказує, що пропускна здатність ОХС дорожча, ніж пропускна здатність PPC. Крім того, вагове співвідношення 1:0.5, як правило, призводить до більшої індивідуальної пропускної здатності ОХС, так як дане вагове співвідношення показує меншу вагу до вузла ОХС.

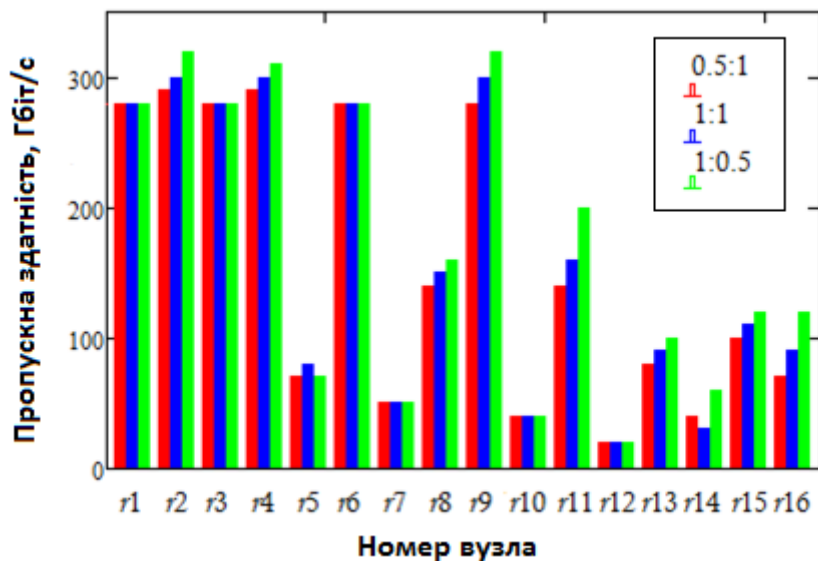


Рис.4.13. Індивідуальна пропускна здатність ОХС при значеннях $M = 10$, $A = 10$ і $C = 10$

Таким чином, була представлена модель оптимізації для оптимізації пропускної здатності вузла в багаторівневій мережі PPC/OTN/DWDM та результати, які показують, що збільшення мережевого навантаження впливає на пропускну здатність, при чому пропускні здатності вузлів на різних рівнях можуть відрізнятися.

4.4. Метод маршрутизації із резервуванням ресурсів, балансуванням навантаження та забезпечення інформаційної безпеки

Балансування навантаження – здатність маршрутизатора розподіляти трафік по всім мережевим портам, які знаходяться на однаковій відстані від отримувача [7]. В алгоритмах розподілення навантаження використовується інформація про пропускну здатність і надійність каналів. Розподілення навантаження підвищує інтенсивність використання мережевих сегментів, а значить і ефективну пропускну здатність мережі в цілому. Розрізняють статичне і динамічне балансування навантаження. У випадку використання статичного балансування пропорції розподілення навантаження не змінюються під час роботи маршрутизатора. Такий підхід є досить простим, але малоефективним, доцільно використовувати динамічне балансування, яке передбачає перерозподіл навантаження під час роботи.

Основною складністю у вирішенні поставленої задачі є те, що при умові різної вартості маршрутів складно досягнути виконання вимог стосовно якості обслуговування. Також потрібно пам'ятати, що мережа представляє собою складний розподілений об'єкт, передбачити поведінку якого в наступний момент часу не є можливим. У більшості випадків гарантована якість обслуговування може бути забезпечена тільки при виділенні віртуального каналу, який передбачає наявність одного маршруту з показниками ефективності функціонування, які вимагаються. В подібних умовах виникають ситуації, коли альтернативні маршрути будуть недовантажені, а забезпечити рівномірне завантаження мережі можливо буде лише пакетами, які не будуть

чутливі до параметрів якості обслуговування. Даний процес маршрутизації показаний рис.4.14.

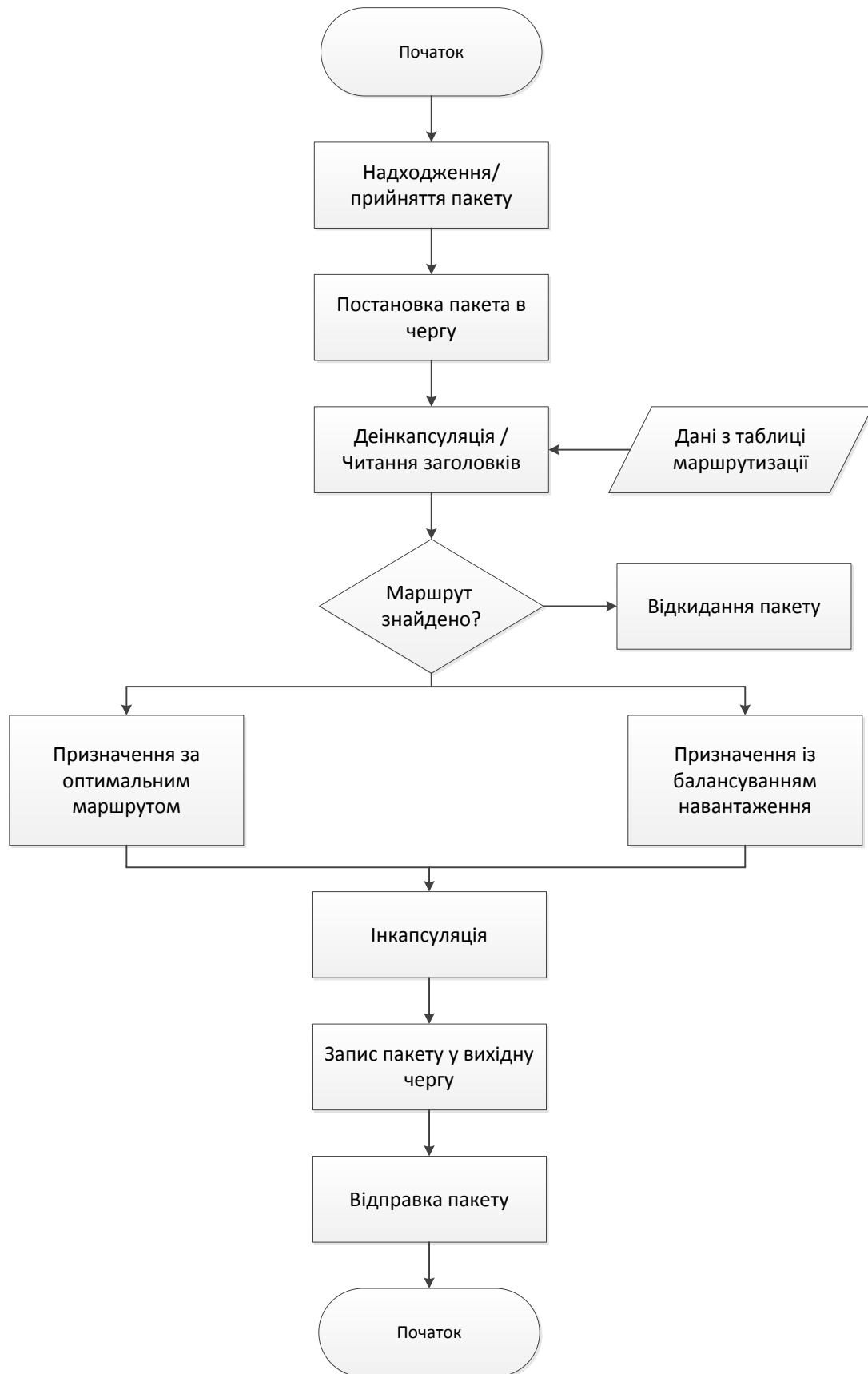


Рис. 4.14. Процес маршрутизації з можливим балансуванням навантаження

Для ефективного дослідження і вирішення поставленої задачі розподілення навантаження важливо адекватно математично описати роботу маршрутизатора. Така математична модель повинна відображати функціональну сторону роботи маршрутизатора, а для прийняття рішень по управлінню повинна бути підкріплена інформацією про структуру і функціонування мережі. По суті маршрутизатор представляє собою накопичувач з набором входів, через які надходить трафік, і набором виходів, через які трафік пересилається до наступних мережевих пристроїв. Тому модель маршрутизатора будемо розглядати як динамічну.

Таким чином, було розроблено метод резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора [7].

Основними відмінностями даного методу від більшості існуючих є те, що він динамічний, а також дозволяє розподіляти навантаження в залежності від стану каналів між альтернативними маршрутами з різною вартістю. Процес маршрутизації з врахуванням методу балансування навантаження за маршрутами з однаковою вартістю наступний.

Етап 1 – Визначення основних характеристик мережі. Проводиться визначення пропускної здатності $B(v,u)$, затримки в мережі $D(v,u)$, завантаженості каналів $L(v,u)$ за допомогою відомих службових або сигналізаційних протоколів стека TCP/IP.

Етап. 2 – Визначення необхідного резерву в каналі зв'язку. Для цього скористаємось проведеними експертними оцінками в розділі 3 (*Етап 2, метод розвантаження раіоінтерфейсу стільникових мереж*) з метою визначення сервісів, якими користуються абоненти стільникових мереж в залежності від часу доби та дня тижня. Тоді для типової БС необхідно буде зарезервувати пропускну здатність каналу транспортної мережі $R(v,u) = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i$, де N_i – кількість абонентів, що користуються i -м сервісом, необхідна пропускну здатність для якого становить C_i . На основі аналізу статистичних даних за

тривалий період часу можна розробити розклад резервування ресурсів транспортної мережі стільникового оператора.

Етап 3 – Вибір оптимального маршруту для відправки пакету. В якості метрики маршруту запропоновано використовувати інтегрований критерій. Для всіх сценаріїв розвантаження було запропоновано вибір метрики та протоколу маршрутизації залежно від виду послуги:

$$M(v,u) = \left(k_1 \cdot B(v,u) + \frac{k_2 \cdot B(v,u)}{B(v,u) - L(v,u) - R(v,u)} + k_3 \cdot D(v,u) \right) \times (C_{scale})^{(2 - (K_R - K_R \cdot (R_{p_{u,v}} + K_P \cdot R_{m,docm})))}, \quad (4.3)$$

де $B(u,v) = \min(b(i,j)), \forall e(i,j) \in P(v,u)$ – пропускна здатність каналу; затримка в каналі $D(v,u) = \sum_{\forall e(i,j) \in P(v,u)} (t_i + t_{e(i,j)})$; $L(v,u)$ – завантаженість каналу; $R(v,u)$ – зарезервована пропускна здатність по кожному маршруту; K_R – коефіцієнт, що дозволяє враховувати чи не враховувати параметри РІБ в формулі метрики, при $K_R \in \{0;1\}$; $R_{p_{u,v}}$ – РІБ для шляху p при передачі даних між вузлами u, v , при $R_{p_{u,v}} \in [0;1]$; $R_{m,docm}$ – ризик несвоєчасної доставки пакетів при їх передачі від вузла u до вузла v по m -му шляху, при цьому $R_{m,docm} \in [0;1]$; K_P – коефіцієнт, який визначає, чи буде враховуватися параметр $R_{m,docm}$ в формулі розрахунку метрики, при цьому $K_P \in \{0;1\}$; k_1 – ваговий коефіцієнт пропускної здатності; k_2 – ваговий коефіцієнт завантаження каналу; k_3 – ваговий коефіцієнт затримки.

Розрахунок показника інформаційної безпеки, що використовується в запропонованій метриці відбувається наступним чином [8, 9].

$$R_{p_{u,v}} = 1 - \left(1 - K_{CVSS} \cdot \frac{\sum_{m \in p} R_{CVSS_m}}{n_p} \right) \cdot \left(1 - K_\theta \cdot \left(1 - \frac{\sum_{m \in p} R_{\theta_m}}{n_p} \right) \right),$$

де $R_{p_{u,v}}$ – РІБ шляху p при передачі ПП між вузлами u, v при $u \neq v$; K_{CVSS} та K_θ – коефіцієнти важливості параметрів ризику R_{CVSS} та R_θ відповідно, при цьому $K_{CVSS} \in [0;1]$, $K_\theta \in [0;1]$; R_{CVSS_m} – параметри ризику R_{CVSS} кожного з

маршрутизаторів m в шляху p ; R_{θ_m} – параметри ризику R_{θ} кожного з маршрутизаторів m в шляху p ; n_p – загальна кількість маршрутизаторів в шляху p .

$$R_{CVSS} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{score_i}}{N_{враз.}} \cdot \frac{1}{10},$$

де B_{score_i} – показчик базової метрики i вразливості, знайденої на заданому маршрутизаторі, при $i = \overline{1, N_{враз.}}$; $N_{враз.}$ – загальна кількість знайдених вразливостей на маршрутизаторі [9].

$$R_{m,дост.} = (1 - P_{m,дост.}) \cdot P_{загрози}$$

де $(1 - P_{m,дост.})$ – ймовірність несвоєчасної доставки ПП отримувачу по шляху m .

$$R_{\theta_i} = \theta_i \cdot P_{загр.}^i$$

де $P_{загр.}^i$ – ймовірність реалізації загрози виведення з ладу маршрутизатора i та всіх його каналів зв'язку, при цьому в даній роботі будемо вважати $P_{загр.} = 1$.

$P_{загрози}$ – ймовірність реалізації загрози, що призводить до зниження імовірності своєчасної доставки даних отримувачу [8].

$$P_{m,дост.}(t) = \int_0^t f_m(t) dt.$$

При цьому вибір вагових коефіцієнтів відбувається на основі класової моделі обслуговування в IP мережах та на основі принципів арифметичної прогресії.

Етап 4 – Балансування мережних ресурсів. Якщо в таблиці маршрутизації наявні принаймні 2 рівноцінні маршрути, то відбувається маршрутизація із забезпеченням балансування навантаження. Кожен вузол транспортної мережі стільникового оператора характеризується такими показниками [10]: $\sum_{i=1}^l \lambda_i^{ex}$ –

загальна інтенсивність вхідного інформаційного потоку; $\sum_{i=1}^l \lambda_i^{in}$ – загальна інтенсивність на виході вузла; $\sum_{i=1}^l C_i$ – загальна пропускна здатність (ПЗ) каналів зв'язку (КЗ) мережі; l – кількість суміжних вузлів та КЗ для зв'язку з ними.

Якщо виявлено два або більше рівноцінних маршрути з однаковою розрахованою на етапі 2 даного методу метрикою, тоді балансування мережевих ресурсів у моделі здійснюється шляхом знаходження вектора розподілу потоку такого виду [10]:

$$\vec{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_l), \quad \sum_{i=1}^l z_i = 1 \quad (4.4)$$

Кожен елемент даного вектора характеризує частку вихідного з вузла трафіку, що передається по відповідному КЗ в суміжний вузол. Через фізичне подання даного вектора та з метою запобігання перевантажень каналів і вузлів ТКС на елементи вектора (4.4) накладаються такі обмеження [10]:

$$0 \leq z_i \leq 1, \quad i = \overline{1..l} \quad (4.5)$$

$$\lambda_i^{in} \cdot k_i \leq C_i - R_i, \quad i = \overline{1..l}, \quad (4.6)$$

де R_i – зарезервована пропускна здатність в i -му каналі зв'язку.

У межах описаної моделі функціонування транспортної мережі у загальному випадку задача управління мережними ресурсами зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі, яка пов'язана з мінімізацією функціонала, в умовах наявності обмежень (4.5); (4.6):

$$\varphi(\vec{K}) = \min(q_1 \cdot \sigma_1(\vec{K}) + q_2 \cdot \sigma_2(\vec{K})), \quad (4.7)$$

де q_1, q_2 – вагові коефіцієнти, які характеризують умовну вартість балансування по завантаженості каналів та вузлів мережі; $\sigma_1(\vec{K})$ – середньоквадратичне відхилення (СКВ) завантаженості каналів $L_i, i = \overline{1..l}$:

$$\sigma_1(\vec{K}) = \sqrt{\frac{1}{l-1} \cdot \sum_{i=1}^l (L_i - \bar{L})^2}; \quad (4.8)$$

де $\sigma_2(\vec{K})$ – СКВ завантаженості локального та суміжних мережевих вузлів $Z_i, i = \overline{1..l}$:

$$\sigma_2(\vec{K}) = \sqrt{\frac{1}{l-1} \cdot \sum_{i=1}^l (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (4.9)$$

Проте в даній роботі процес балансування навантаження стосується саме каналів зв'язку, тому представлена задача спрощується і має наступний вигляд:

$$\varphi(\vec{K}) = \min(\sigma_1(\vec{K})), \quad (4.10)$$

Проведений аналіз [10] показав, що найбільш ефективним засобом мінімізації цільового функціоналу управління мережними ресурсами у виразі (4.10) є градієнтний метод із послідовним наближенням.

Проте, в даній роботі процес балансування навантаження стосується саме каналів зв'язку, тому представлена задача враховує тільки (4.8), а тому може бути вирішена послідовним наближенням завантаженості кожного каналу до середнього значення. Для цього має бути виконаний наступний алгоритм:

Вхідні дані: поточна завантаженість каналів; розмір вхідних даних, які надходять на вхід пристрою маршрутизації;

Вихідні дані: збалансована завантаженість каналів;

$$L_{сер} \leftarrow \sum_{i=1}^l L_i / N;$$

Процедура знаходження мінімального значення L_i ;

Процедура відправки порції даних по найменш завантаженому маршруту.

При надходженні нової порції даних виконання даного алгоритму повторюється.

Висновки до розділу 4

Сукупність положень, отриманих в результаті підготовки даного розділу надала можливість отримати наступні результати.

1. Фактична якість обслуговування абонентів перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування транспортних підсистем та методів керування ними. Тому необхідно було провести удосконалення моделі транспортної мережі, провести

її оптимізацію та забезпечити розроблення нових методів та моделей для підвищення ефективності функціонування та захищеності транспортних мереж.

2. Таким чином, було вперше розроблено метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, який полягає у послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми станцій радіорелейного зв'язку із врахуванням технологічних обмежень до пропускної здатності каналів, оптимізації структури кожного нижнього шару із врахуванням технологічних обмежень кожного рівня, заснованих на різноманітних параметрах мережі та показниках вартості. Запропонований метод дозволяє здійснити удосконалення структури транспортної мережі при переході до мереж нових поколінь, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та підвищення ефективності функціонування транспортної мережі до 10%.

3. Удосконалено метод маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки, що полягає у послідовному визначенні характеристик мережі (пропускна здатність, затримка, завантаженість каналу), визначенні необхідного резерву в каналі зв'язку, визначенні альтернативних шляхів передавання даних з урахуванням ризиків інформаційної безпеки, розробці порогових значень для різних типів сервісів та виконанні перерозподілу потоків. Запропонований метод дозволяє, надаючи підвищений рівень надійності мережі та захищеності, оптимізувати утилізацію транспортних каналів до 70-80%.

4. Основні результати, висвітлені в даному розділі, опубліковані в [2, 5, 7, 8, 11].

Список використаних джерел в четвертому розділі

1. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. Москва: Эко-Трендз, 2010. 284с.

2. Одарченко Р.С., Мирутенко Л.В., Даков С.Ю. Удосконалений метод побудови опорного сегменту мережі LTE. *Наукоємні технології*. 2018. №1(37). С.18-26.

3. Копылов А.М. Радиорелейные линии связи. 2008. URL: https://www.itu.int/ITU-D/tech/events/2008/TashkentNovember2008/Presentations/Tashkent_Nov08_File7.pdf

4. Колотовкина Г. В., Храпова Е. А. Оптические мультиплексоры для технологии WDM. *Наука XXI века: опыт прошлого – взгляд в будущее*. Материалы II Международной науч.-практ. конф. Омск, 2016. С. 168–173.

5. Odarchenko R. Improved Method of Routing in UAV Network / R. Odarchenko, S. Gnatyuk, T. Zhmurko, O. Tkalich // Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (APUAVD), Kyiv, Ukraine, October 13-15, 2015: Vol. 1. P. 294-297.

6. Iyad A. Katib/ IP/MPLS over OTN over DWDM MULTILAYER networks: optimization models, algorithms, and analyses: a dissertation in Telecommunications & Computer Networking and Computer Science & Informatics Presented to the Faculty of the University of Missouri–Kansas City in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy. 2011. P. 176.

7. Одарченко Р.С., Харлай Л.О. Метод резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі з урахуванням основних характеристик мереж. *Технічні науки та технології*. 2018. №1(11). С. 89-96.

8. Снегуров А.В. Особенности формирования метрики маршрутизации, основанных на рисках информационной безопасности. *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XVII Международного молодежного форума: Харьков, 2013. Т. 4. С. 226-227*

9. Снегуров А.В. Метод формирования метрик маршрутизации, основанный на рисках информационной безопасности. *Системы управління, навігації та зв'язку*. Вип. 4(24). 2012. С. 105-110.

10. Буханько О. М. Моделі та метод управління мережними ресурсами в телекомунікаційних системах на основі Е-мереж: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю: 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі». Харків. ХНУРЕ, 2010. 19 с.

11. Odarchenko R. Transport network optimization methods of mobile operators in Ukraine /R. Odarchenko, Y. Kochergin, A. Abakumove, D. Vergeles// Proceedings of the 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON, Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June 2017 – P. 1107-1112.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕЮ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА

Концепція SDN [1] – відносно нова технологія у сфері телекомунікацій, покликана виправити недоліки традиційних мереж. Програмно-конфігурована мережа сьогодні є однією з найперспективніших технологій у галузі комп'ютерних мереж. Модель SDN має ряд переваг над традиційними мережами, серед яких розробники виділяють наступні [2]: підвищення ефективності мережевого обладнання на 25-30%; зниження на 30% витрат на експлуатацію мереж; надання користувачам можливості програмно створювати нові сервіси і оперативно завантажувати їх в мережеве обладнання.

Виявлено, що SDN краще відповідає вимогам, які висуваються до мереж критичної інформаційної інфраструктури [3].

Застосування програмно-конфігурованих мереж для керування мережею стільникового оператора надає ряд переваг, тому впроваджується в найбільших мережах. Проте залишається ряд невирішених проблем, пов'язаних із імплементацією даного типу мереж. Тому в даному розділі була проаналізована концепція SDN та SDR на можливість їх використання операторами стільникового зв'язку; розроблена модель оцінки ефективності розгортання різних архітектур мереж SDN для керування мережею стільникового зв'язку та впровадження нових сервісів. Також були розроблені рекомендації по розгортанню мереж SDN.

5.1. Архітектура мобільної мережі з використанням SDN та SDR

Як було показано в розділі 3, із використанням SDR в стільникових мережах, можливим є зменшення кількості модулів BBU, чим спрощується мережеве обладнання. Крім того, можливе використання спільного транспорту для передачі інформації по трьом різним інтерфейсам для мереж різних поколінь.

Ця архітектура фактично означає заміну всіх типів різноманітного обладнання мобільних мереж (BSC, RNC, MSC, MGW, SGSN, GGSN, MME, S-GW, P-GW та ін.) загальною апаратною платформою, на якій віртуалізуються всі їхні функції. Фактично, замість великого різноманіття матимемо потужний гіпервізор з запущеними на ньому віртуальними машинами, кожна з яких виконуватиме одну з функцій апаратного забезпечення.

Стільникова мережа, побудована таким чином, дозволяє створювати сучасні мобільні мережі, на яких легко можна переходити від стандарту до стандарту (GSM-UMTS-LTE-5G) і надавати новітні послуги в найкоротші терміни.

Архітектура мережі з використанням SDR/SDN зображена на рис. 5.1 [4].

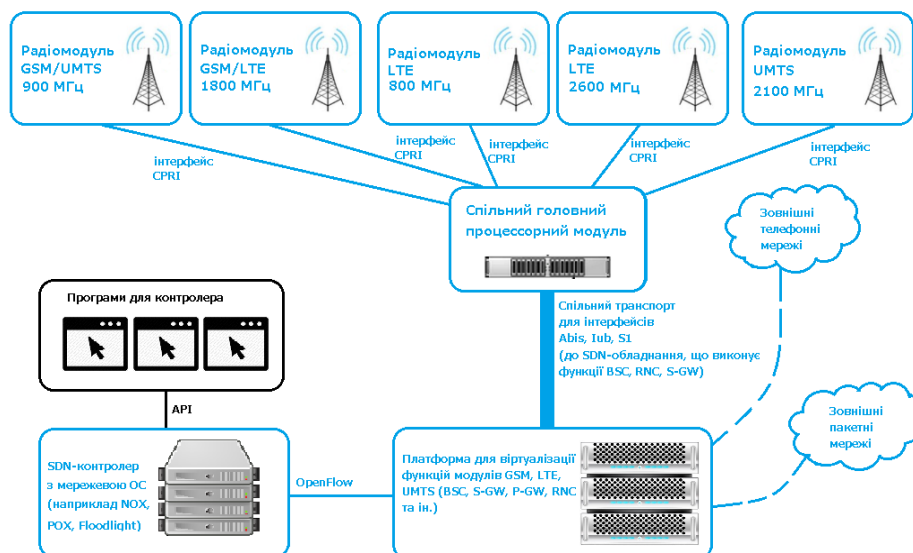


Рис. 5.1. Архітектура мобільної мережі з використанням SDN та SDR

5.2. Використання SDN для побудови транспортної мережі з застосуванням OTS

Програмно-конфігуровані мережі можуть докорінно змінити оптичні транспортні мережі, які є основою стільникових мереж. SDN дозволить застосовувати централізований контроль над мережею, забезпечить її програмованість та автоматизацію надання різних сервісів для різних типів QoS.

Тому ONF (Open Network Foundation) [5] проводить розробку OTS (Open Transport Switches), які працюють як посередники між контролером та оптичним комутатором. OTS взаємодіє з контролером через протокол OpenFlow, а для взаємодії з оптичним комутатором використовується специфічний командний синтаксис для конкретного комутатора.

В оптичній мережі OTS, що під'єднаний до комутатора, отримує відомості про параметри цього комутатора і передає їх до контролера. Контролер отримує інформацію про кількість каналів, пропускну здатність, параметри QoS тощо. Таким чином контролер отримує повне бачення ресурсів мережі.

Внутрішні модулі OTS передають параметри апаратного забезпечення контролеру, повідомляють контролеру про зміни стану каналу, здійснюють моніторинг продуктивності. Для оптичних комутаторів різних виробників необхідні різні модифікації OTS, хоча більшість коду однакова. Відрізняються ті модулі, що напряму взаємодіють з фізичними інтерфейсами комутатора. OTS представляє собою сервер з встановленим на нього віртуальним програмним комутатором. Його внутрішня структура зображена на рис. 5.2 [6].

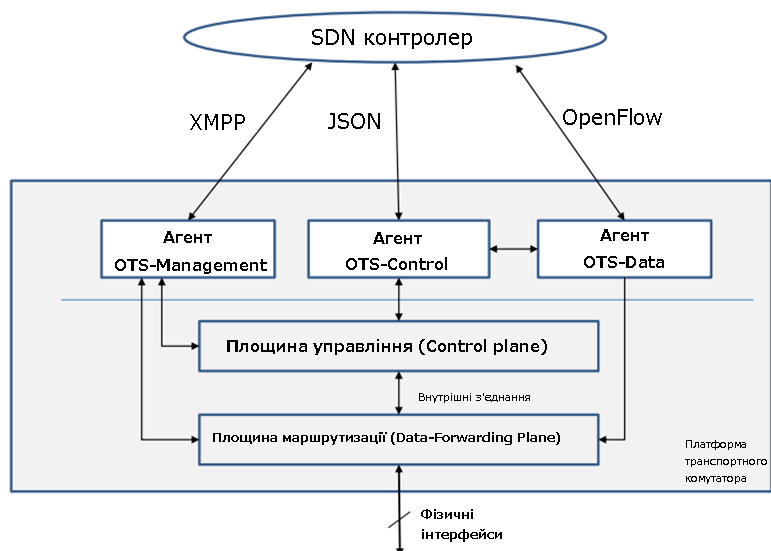


Рис.5.2. Логіка побудови OTS

Система управління з використанням OTS може працювати в двох режимах: явному (explicit) і неявному (implicit) [7].

При використанні явного режиму роботи кожен транспортний комутатор має асоційований OTS. Тому мережевий контролер контролює напряму кожен транспортний комутатор в мережі. Такий режим роботи є більш ефективним, адже всі можливості протоколу OpenFlow та програмних додатків (а отже і переваги SDN) можуть використовуватися в повному обсязі. Але при цьому реалізація такого режиму є набагато дорожчою і в деяких випадках може бути надлишковою. Такий режим роботи для топології DWDM із підрозділу 4.4 для мобільного оператора показаний на рис. 5.3.

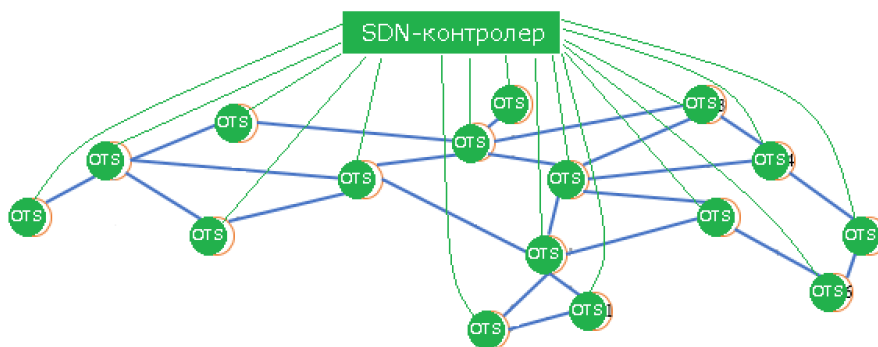


Рис.5.3. Явний режим роботи

При неявному режимі роботи OTS з'єднуються лише з тими комутаторами, що знаходяться на краях доменів. При цьому також використовуються існуючі сигнальні протоколи та протоколи маршрутизації всередині транспортних доменів. Контролер керує лише тими комутаторами, що під'єднані до OTS напряму. Всередині доменів маршрутизація здійснюється протоколами транспортної мережі.

В такому випадку для керування мережею необхідно розбивати її на окремі домени, що мають кільцеву топологію. На рис. 5.4 розглянута вище топологія розділена на 5 таких доменів. В вузлах, що знаходяться в місцях стику кожного з доменів розміщуються OTS. При цьому бажано, щоб кожен з вузлів без OTS мав по сусідству хоча б один вузол з OTS (щоб команди контролера доходили з меншою затримкою). На рис. 5.4 виконання цієї умови дотримано.

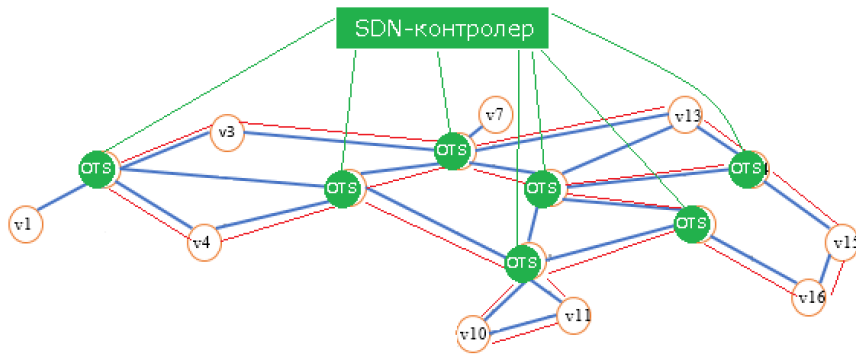


Рис. 5.4. Неявний режим роботи

Для управління вузлами мережі, що не мають приєднаних OTS, можна використовувати програмний додаток контролера для конвертації команд контролера OpenFlow в SNMP і навпаки. Використовуючи такий метод контролер може моніторити ресурси мережі шляхом регулярного відправлення SNMP-запитів, отримувати інформацію про зміну стану каналу шляхом відслідковування SNMP-Trap тощо. Послідовність відправлення SNMP команди до вузла, що не має OTS відображена на рис. 5.5 [9].

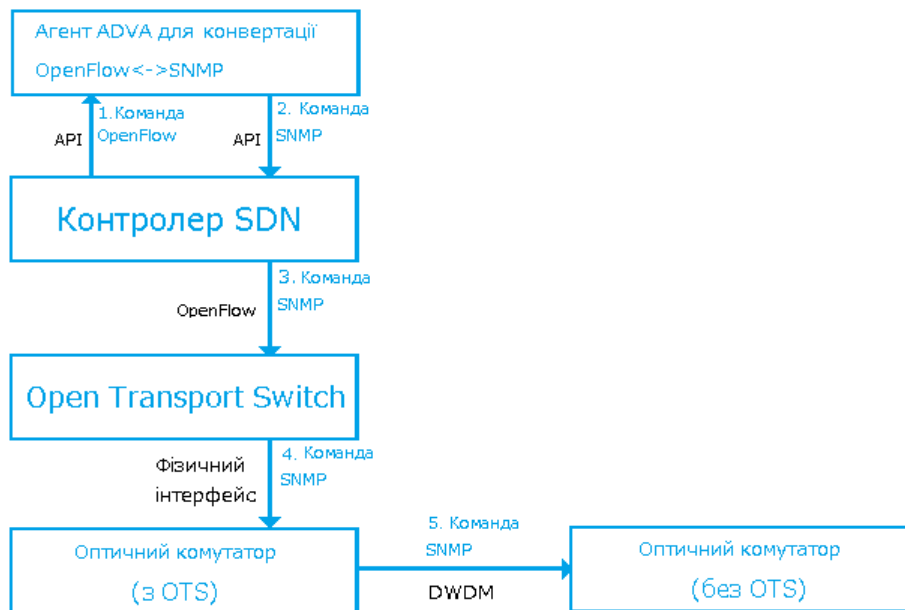


Рис. 5.5. Відправлення команди контролером до вузла без OTS

Звичайно, в такому випадку, можливості управління будуть обмежені можливостями протоколу SNMP, проте вартість такого рішення буде меншою.

В разі виникнення необхідності, можливо поступово переходити від неявного до явного управління мережею, поступово додаючи OTS-сервери до вузлів мережі.

5.3. Оцінка ефективності мереж SDN

5.3.1. Узагальнена модель оцінки ефективності мережі SDN

Проектування мережі є складним завданням для кожного оператора. Перший крок – зрозуміти загальні вимоги до мережі. Виявивши ці вимоги, можна вибрати ключові характеристики мережі, які відповідають цим вимогам.

Мережні пристрої повинні відображати цілі, характеристики та політику постачальника послуг, в якому вони працюють. Два головних завдання побудови та впровадження мереж – забезпечення доступності додатків та зменшення вартості володіння.

Добре розроблена мережа може допомогти збалансувати вищевказані цілі. При правильному застосуванні, мережева інфраструктура може оптимізувати доступність додатків та забезпечити більш економічне використання існуючих мережевих ресурсів.

Отже, починаючи розробляти або оптимізувати мережу або, наприклад, вибрати найкращий маршрут, повинні бути відомими основні вимоги до нових сервісів, які планується розгортати (рис. 5.6) [9].

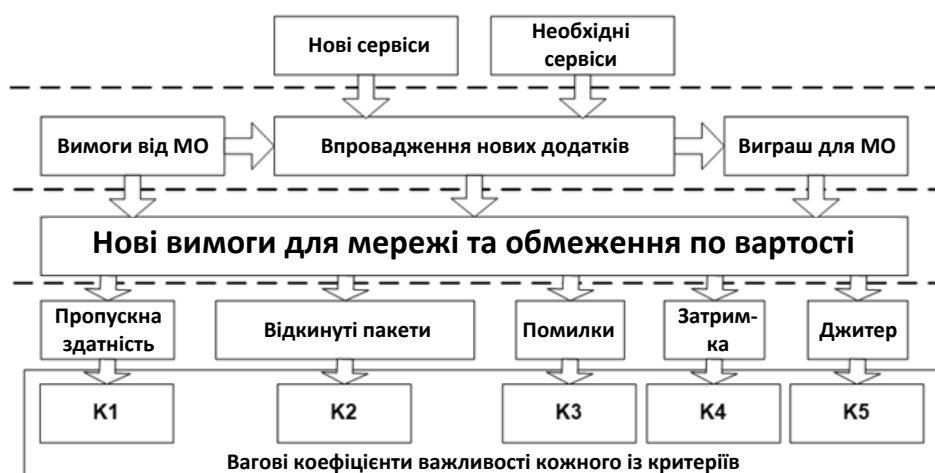


Рис. 5.6. Процес впровадження нового сервісу

Таким чином, як показано на Рисунку 5.6, для реалізації нової послуги, оператор мобільного зв'язку повинен перевірити основні характеристики мережі для відповідності мінімальному порогу для кожної реалізованої послуги. Деякі характеристики будуть більш цінні, а невідповідність деяких з них не є критичною для застосування. Таким чином, будуть сформовані вагові коефіцієнти $K1 - K5$, які будуть використовуватися для майбутніх обчислень загальної ефективності функціонування.

Як частина завдання ефективного функціонування мереж SDN спочатку необхідно оцінити такі характеристики, як продуктивність, затримку та масштабованість. Ці характеристики залежать від кількості керованих комутаторів та їх підключення до контролера, інтенсивності отриманих запитів, а також від обробки запитів контролера. Таким чином, ефективність мереж SDN залежить від того, що контролер адаптується до зростаючої інтенсивності запитів від комутаторів та можливостей для забезпечення якості обслуговування шляхом збільшення масштабу мережі [11]. Таким чином, оцінка масштабованості мережі, затримки та продуктивності, є важливим завданням при розробці нової або розширенні існуючої архітектури мережі [12]. Тому основним завданням цієї роботи є розробка методу оцінки ефективності функціонування мереж SDN, що дозволить розрахувати основні характеристики SDN (затримку, продуктивність, масштабованість) для кожного типу мережі в різних випадках.

Визначення ефективності функціонування всіх мереж SDN або їх частин для розгортання різних сервісів зберігатиметься до визначення складних критеріїв за допомогою аналітичної ієрархічної системи для кожного оператора мобільного зв'язку. По-перше, як показано на рис. 5.7, буде проведено визначення пріоритетів для різних критеріїв.

На рисунку показана ієрархія, в якій пріоритети елементів за замовчуванням вважаються рівними, тобто всі чотири критерії мають однакове значення з точки зору цілі, а пріоритети всіх альтернатив є рівними за всіма критеріями. Іншими словами, у цьому прикладі альтернативи не відрізняються.

Глобальні пріоритети альтернатив щодо цілі обчислюються шляхом множення місцевого пріоритету кожної альтернативи на пріоритет кожного критерію та підсумовування за всіма критеріями.



Рис. 5.7. Ієрархічна модель оцінки ефективності функціонування

Прийняття пріоритетних рішень може бути зроблено або на основі об'єктивних даних (у тому числі методів оптимізації та імовірнісних та статистичних моделей) або на основі поглядів фахівця (експертів). У завданнях аналізу доцільності завжди використовуються різні експертні оцінки методів.

Для оцінки комплексної ефективності запропоновано використання наступної більш простої моделі (рис 5.8).

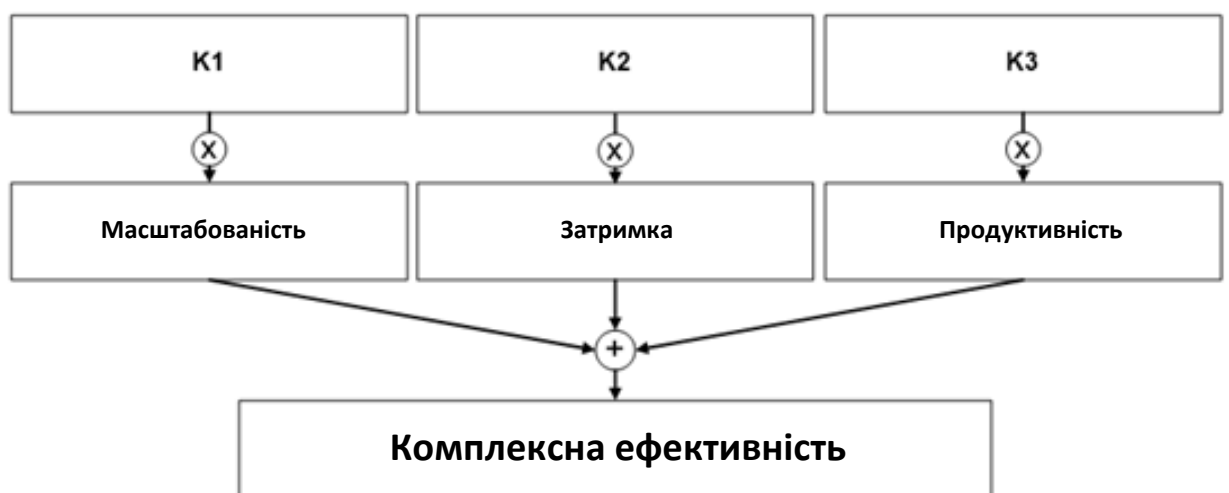


Рис. 5.8. Модель для визначення комплексної ефективності мережі SDN

У цій моделі (рис 5.8) комплексна ефективність визначається як зважена сума масштабованості, затримки мережі та її продуктивності. Таким чином,

надалі наведено математичний апарат для визначення складної ефективності. Проте цей математичний треба розглядати крізь призму різних існуючих підходів до побудови архітектури рівня управління.

5.3.2. Підходи до побудови архітектури рівня управління

Контролер, як централізований елемент управління, охоплює безліч функцій [12]. Основними з них є: управління мережевими елементами, ресурсами і додатками; побудова топології мережі і постійний моніторинг її стану; обробка даних, що передаються. Спочатку архітектура рівня управління передбачала наявність лише одного контролера (рис. 5.9).

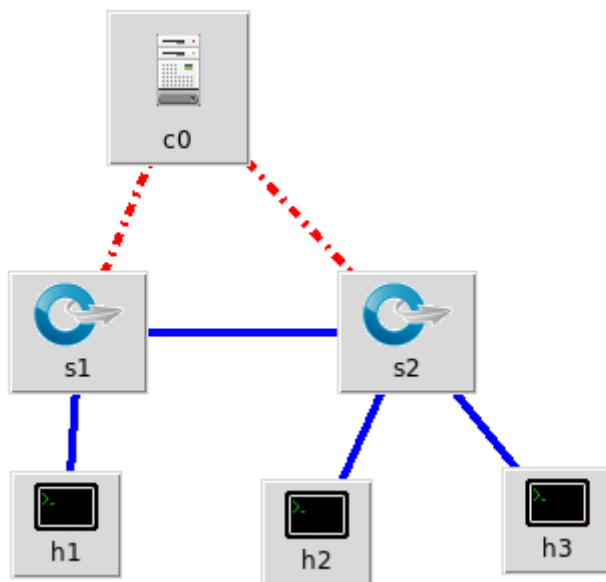


Рис. 5.9. Централізована архітектура

Але з ростом масштабів мережі з'явилася необхідність внесення змін в існуючу архітектуру. Підвищити масштабованість рівня управління вдалося за допомогою введення додаткових контролерів, а також зміни структури рівня управління – формування децентралізованої та ієрархічної структур рівня управління. Рішення полягає в розробці розподіленої архітектури SDN такої як Hyperflow [13], Onix [14], і Kandoo [15].

Hyperflow є децентралізованою структурою, в якій всі контролери мають рівноцінні права і функції. Hyperflow забезпечує масштабованість, при цьому

мережа залишається логічно централізованою: кожен контролер в Hyperflow має інформацію про всю мережу і обслуговує запити комутаторів, що знаходяться в безпосередній близькості, що мінімізує час встановлення нового потоку.

Альтернативна конструкція представляє собою збереження стану контролера в розподіленому сховищі даних і включення локального кешу на окремих контролерах (рис. 5.10). Наприклад, якщо рішення (зокрема, вибір шляху) може бути зроблене для багатьох потоків після звернення до локального кешу, неминуче деякі потоки вимагають вилучення з віддалених контролерів, в результаті чого збільшується час обслуговування. Крім того, ця конструкція вимагає модифікації додатків для збереження стану в розподіленому сховищі даних. На противагу цьому, Hyperflow активно повідомляє про зміну стану, тим самим забезпечуючи контролери актуальною інформацією для локального обслуговування усіх потоків.

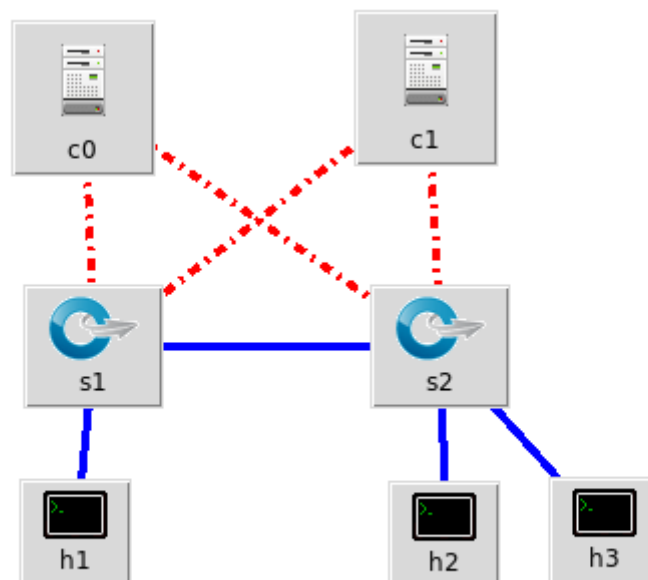


Рис. 5.10. Децентралізована структура (глобальна)

Onix – децентралізована структура мережі, що розподіляється між декількома контролерами (рис. 5.11). Кожен контролер має інформацію про свою локальну мережу.

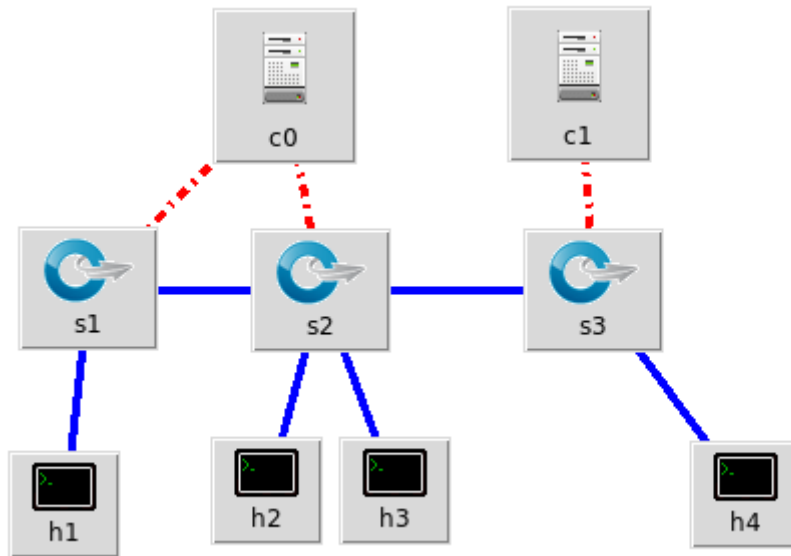


Рис. 5.11. Децентралізована архітектура (локальна)

Kandoo є ієрархічною структурою (рис. 5.9) [15]. Є два класи контролерів: кореневий контролер і локальний контролер. Локальні контролери мають обмежений функціонал і не містять інформації щодо всієї топології мережі. Локальний контролер управляє одним або кількома комутаторами, що виступають проксі-комутаторами для корневих контролерів. А кореневий контролер має інформацію про всю мережу. Кореневий контролер управляє усіма локальними контролерами і може запускати додатки, яким потрібен доступ до мережі. Локальні контролери можуть бути реалізовані безпосередньо в OpenFlow комутаторах. Локальні контролери можуть лінійно масштабуватися паралельно з числом комутаторів в мережі. Таким чином, площина управління масштабується до тих пір, поки часті події обробляються в локальних додатках і захищають кореневі контролери від цих частих подій. В Kandoo не застосовуються додатки, які вимагають знання стану всієї мережі. Реалізація Kandoo повністю відповідає специфікаціям OpenFlow. Перевагою Kandoo є те, що вона дає мережевим операторам свободу конфігурувати рівень управління та його функціональність, заснованих на характеристиках додатків управління.

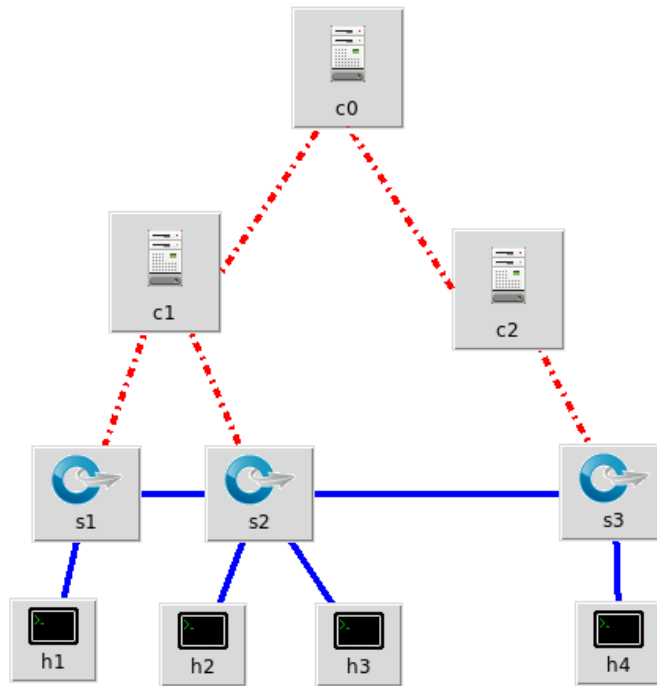


Рис. 5.12. Ієрархічна структура

5.3.3. Модель архітектури SDN

Централізована структура. Для централізованої структури характерно прибуття запитів від комутаторів на один загальний контролер, який підпорядковується Пуасонівському закону розподілу.

Середня швидкість надходження запитів потоку:

$$\lambda_c = N \cdot (N - 1) \cdot \lambda, \quad (5.1)$$

де N – це кількість мережевих вузлів, λ – середнє число запитів потоку від одного хоста на інший в секунду.

Час обробки контролером має експоненціальний розподіл. А середня швидкість обробки $\mu_c(N)$ обернено пропорційна масштабу мережі N . Тоді:

$$\mu_c(N) = \frac{K}{g(N)} = \frac{K}{N^2}.$$

Середній час відгуку на запит може бути задано як:

$$E(T_c(N)) = \frac{1}{\mu_c - \lambda_c}, \quad (5.2)$$

де μ_c – це середня швидкість надходження запитів потоку, λ_c – середня швидкість обробки запитів потоку контролером.

Децентралізована структура. Децентралізована структура рівня управління складається з декількох контролерів m_D . І є дві стратегії для побудови децентралізованої структури.

У першій стратегії (так звана локальна стратегія), кожен контролер володіє інформацією про свою локальну мережу, і кожна сусідня з ним локальна мережа абстрагується як логічний вузол. Кожен контролер відповідає за окремий фрагмент мережі. Потоки можна розділити на два типи: глобальні потоки (зв'язок між контролерами різних фрагментів мережі) і локальні потоки (зв'язок з комутаторами фрагмента мережі), тобто якщо хост і вузол призначення потоку знаходяться під управлінням одного контролера. Запит ініціювання локального потоку обробляється тільки одним контролером, а запит створення глобальних потоків обробляється декількома контролерами. Коли контролер отримує запит глобального ініціювання потоку, то даний запит ініціювання потоку буде розбитий на два запити ініціації. Одним з них є локальний запит ініціалізації потоку для контролера, а інший є глобальним запитом ініціалізації потоку для одного з сусідніх контролерів.

Запит глобального ініціювання потоку обробляється за тим принципом, що і запит локального ініціювання потоку. Якщо середня відстань до контролера d_D , кожен глобальний запит ініціювання потоку в середньому буде розділений на d_D+1 локальних запитів. І час відповіді на запит ініціювання глобального потоку буде сумою часу відгуку для цих локальних запитів. Серед $N \cdot (N-1)$ потоків, є $\frac{N^2}{m_D} - N$ локальних потоків і $N^2 - \frac{N^2}{m_D}$ глобальних потоків.

Можна зробити висновок, що швидкість надходження запиту ініціювання потоку на кожний контролер становить:

$$\lambda_{D,l} = \lambda \cdot \frac{(N^2 - \frac{N^2}{m_D}) \cdot (D_d + 1) + (\frac{N^2}{m_D} - N)}{m_D}. \quad (5.3)$$

де λ – середнє число запитів потоку в секунду від одного хоста на інший, N – кількість мережевих вузлів, m_D – кількість контролерів, d_D – середня відстань до контролера.

Кожен контролер повинен управляти по меншій мірі $\frac{N}{m_D} + m_D - 1$ вузлами.

Таким чином, середня швидкість обслуговування контролером становить:

$$\mu_{D,l} = \frac{K}{g\left(\frac{N}{m_D} + m_D - 1\right)} \quad (5.4)$$

де λ – середнє число запитів потоку в секунду від одного хоста на інший, N – кількість мережевих вузлів, K – обчислювальна потужність контролера, m_D – кількість контролерів.

Відповідно до закону Літтла довжина черги для кожного контролера складає:

$$L_{D,l} = \frac{\lambda_{D,l}}{\mu_{D,l} - \lambda_{D,l}} \quad (5.5)$$

На основі теорії мережі Джексона, середній час обробки запиту кожним контролером може бути представлений наступним співвідношенням:

$$E(T_{D,l}) = \frac{L_{D,l} \cdot m_D}{N \cdot (N - 1) \cdot \lambda} = \frac{1 + \frac{N \cdot (m_D - 1)}{(N - 1) \cdot m_D} \cdot d_D}{\mu_{D,l} - \lambda_{D,l}} \quad (5.6)$$

У другій стратегії (так звана глобальна стратегія), кожен контролер має загальне уявлення про мережу. Таким чином, кожен контролер може обробляти всі запити потоку ініціації створені своїми локальними мережами.

Середня швидкість обслуговування контролера становить:

$$\mu_{D,g} = \frac{K}{g(N)}. \quad (5.7)$$

Середня швидкість прибуття запиту ініціації на кожний контролер складає:

$$\mu_{D,g} = \frac{\lambda \cdot N \cdot (N - 1)}{m_D} \quad (5.8)$$

Отже, середній час відгуку запитів ініціювання потоку визначається:

$$E(T_{D,g}(N)) = \frac{1}{\mu_{D,g} - \lambda_{D,g}}. \quad (5.9)$$

Ієрархічна структура. Ієрархічна структура, як правило, має два рівні. Розглянемо ієрархічну структуру з двома рівнями, а ієрархічна структура з більш ніж двома рівнями може бути проаналізована аналогічним чином.

У даній структурі контролери організовані у вигляді дерева, і вони діляться на два типи: один головний контролер і кілька периферійних контролерів. Периферійні контролери керують рівнем даних безпосередньо. Кожен має інформацію про свою локальну мережу. Керування периферійним контролером здійснюється за допомогою головного контролера. Периферійний контролер і його локальна мережа виділені в якості логічного вузла за допомогою головного контролера. Топологія головного контролера має вид топології цих логічних вузлів. Потік можна класифікувати на два типи: локальні потоки і глобальні потоки. Периферійний контролер керує одним локальним потоком хоста джерела і хоста призначення. Глобальні потоки навпаки. Кожен запит локального ініціювання потоку буде оброблятися тільки одним периферійним контролером. А кожен глобальний запит ініціювання потоку, по-перше, буде оброблений головним контролером, а потім буде розбитий на кілька локальних запитів, які будуть бути оброблені відповідними периферійними контролерами.

Припустимо, що є m_H периферійних контролерів і середня відстань до периферійного контролера d_H . Тому, головний контролер керує логічними графами з m_H вузлами. Головний контролер має середню швидкість обслуговування $\mu_{H,r} = \frac{K}{g(m_h)}$. Кожен периферійний контролер керує $\frac{N}{m_H}$ хостами. Тоді кожний периферійний контролер має середню швидкість обслуговування:

$$\mu_{H,l} = \frac{K}{g\left(\frac{N}{m_H}\right)}.$$

Нехай $C_{i,j}$ позначимо через j -тий контролер i -го рівня (головний контролер на першому рівні і периферійний контролер на другому рівні). $C_{x,y}$ позначимо як множину контролерів, які потрібні для обробки запитів ініціювання $f_{x,y}$. Нехай $I_{x,y}(i,j)$ буде бінарна змінна, що вказує на приналежність $C_{i,j} \in C_{x,y}$. Значення $I_{x,y}(i,j)$ визначається наступним чином:

$$I_{x,y}(i,j) = \begin{cases} 1, & C_{i,j} \in C_{x,y} \\ 0. & \end{cases} \quad (5.10)$$

Серед $N^2 - N$ потоків, є $\frac{N^2}{m_H} - N$ локальних потоків і $N^2 - \frac{N^2}{m_H}$ глобальних потоків. Таким чином, отримаємо:

$$\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N I_{x,y}(1,1) = N^2 - \frac{N^2}{m_H} \quad (5.11)$$

$$\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N \sum_{j=1}^{m_H} I_{x,y}(2,j) = \left(N^2 - \frac{N^2}{m_H}\right) \cdot (d_H + 1) + \frac{N^2}{m_H} - N \quad (5.12)$$

Таким чином, середня швидкість надходження запитів ініціювання потоку на головний контролер:

$$\lambda_{H,r} = \lambda \cdot \sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N I_{x,y}(1,1) \quad (5.13)$$

Середня швидкість надходження запитів на кожний периферійний контролер:

$$\lambda_{H,l} = \lambda \cdot \sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N \sum_{j=1}^{m_H} \frac{I_{x,y}(2,j)}{m_H}. \quad (5.14)$$

Нехай T_H позначимо як час відгуку для запиту ініціювання потоку. Можна розділити T_H на дві частини: час відгуку головного контролера позначимо через

T_r і час відгуку периферійного контролера – T_l . Одержимо $E\{T_H\} = E\{T_r\} + E\{T_l\}$.

Нехай за $T_{r_{x,y}}$ позначимо час відгуку запиту ініціювання $f_{x,y}$ в головному контролері (якщо $f_{x,y}$ – локальний потік, $T_{r_{x,y}} = 0$). Нехай $T_{c_{i,j}}$ позначимо як час відгуку для запиту ініціювання при $C_{i,j}$. Тоді, ми можемо отримати продуктивність контролера даної структури:

$$E(T_r) = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N E(T_{r_{x,y}})}{N \cdot (N-1)} = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N E(T_{c_{1,1}}) \cdot I_{x,y}(1,1)}{N \cdot (N-1)} = \frac{N - \frac{N}{m_H}}{N-1} \cdot \frac{1}{\mu_{H,r} - \lambda_{H,r}}. \quad (5.15)$$

Якщо $f_{x,y}$ являє собою глобальний потік, запит ініціювання, що генерується $f_{x,y}$, буде розділений на $\sum_{j=1}^{m_H} I_{x,y}(2, j)$ локальних запити головним контролером.

І ці запити будуть відправлені на відповідні периферійні контролери в $C_{x,y}$ одночасно. Нехай $T_{l_{x,y}}$ позначимо за час відгуку $f_{x,y}$ запиту ініціації на периферійному контролері. Тому $T_{l_{x,y}}$ дорівнює найдовшому часу відповіді для цих локальних запитів. Таким чином, маємо:

$$T_{l_{x,y}} = \text{Max}_{j=1}^{m_H} I_{x,y}(2, j) \cdot T_{c_{2,j}}. \quad (5.16)$$

Якщо $f_{x,y}$ являє собою локальний потік, то вираз $T_{l_{x,y}}$ буде таким самим як і для глобального потоку. Так як $T_{c_{2,j}} (j=1, 2, \dots, m_H)$ незалежні і однаково розподілені, і мають негативний експоненціальний розподіл з середнім значенням $\frac{1}{\mu_{H,l} - \lambda_{H,l}}$, отримаємо:

$$\begin{aligned} P(T_{l_{x,y}} < t) &= \prod_{j=1}^{m_H} P\{I_{x,y}(2, j) \cdot T_{c_{2,j}} < t\} = \\ &= \left(1 - e^{(\lambda_{H,l} - \mu_{H,l})t}\right) \cdot \sum_{j=1}^{m_H} I_{x,y}(2, j) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Нехай $d_{x,y} = \sum_{j=1}^{m_H} I_{x,y}(2, j)$. Функція щільності ймовірності $T_{l_{x,y}}$:

$$f_{T_{l_{x,y}}}(t) = d_{x,y} \cdot \left(1 - e^{(\lambda_{H,l} - \mu_{H,l})t}\right)^{d_{x,y}-1} \cdot (\lambda_{H,l} - \mu_{H,l}) \cdot e^{(\lambda_{H,l} - \mu_{H,l})t} \quad (5.17)$$

Тоді середнє значення $T_{l_{x,y}}$:

$$E\{T_{l_{x,y}}\} = \int_0^{\infty} f_{T_{l_{x,y}}}(t) \cdot t dt = \frac{d_{x,y}}{\lambda_{H,l} - \mu_{H,l}} \cdot \sum_{i=0}^{d_{x,y}-1} \binom{d_{x,y}-1}{i} \cdot \frac{(-1)^i}{d_{x,y}^2} \leq \frac{\ln d_{x,y} + 1}{\lambda_{H,l} - \mu_{H,l}} \quad (5.18)$$

Таким чином, виходить:

$$E\{T_l\} = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N E\{T_{l_{x,y}}\}}{N \cdot (N-1)} < \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N (\ln d_{x,y} + 1)}{N \cdot (N-1) \cdot (\mu_{H,l} - \lambda_{H,l})} k < \\ < \frac{\ln \left(\frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1, y \neq x}^N d_{x,y}}{N \cdot (N-1)} \right) + 1}{\mu_{H,l} - \lambda_{H,l}} = \frac{\ln \left(\frac{N - \frac{N}{m_H}}{N-1} \cdot d_H + 1 \right) + 1}{\mu_{H,l} - \lambda_{H,l}} \quad (5.19)$$

Таким чином, середній час відгуку в ієрархічній структурі:

$$E(T_H) = \frac{N-1}{\mu_{H,r} - \lambda_{H,r}} + \frac{\ln \left(\frac{N - \frac{N}{m_H}}{N-1} \cdot d_H + 1 \right) + 1}{\mu_{H,l} - \lambda_{H,l}} \quad (5.20)$$

5.3.4. Оцінка масштабованості рівня управління SDN

Рівень управління SDN є розподіленою системою. Таким чином, ми можемо використовувати масштабованість розподіленої системи для кількісної оцінки масштабованості рівня управління SDN. Метрика масштабованості для розподіленої системи заснована на продуктивності. Така система масштабується, якщо продуктивність зберігається при зміні масштабу системи. На рівні управління SDN продуктивність $F(N)$ може бути визначена наступним чином:

$$F(N) = \varphi(N) \cdot \frac{T(N)}{C(N)} \quad (5.21)$$

де N – це кількість мережевих вузлів, $\varphi(N)$ – пропускна здатність рівня управління в обробці мережевих запитів, $T(N)$ – середній час відгуку кожного запиту, $C(N)$ – витрати на розгортання рівня управління.

Тоді масштабованість метрики рівня управління SDN виглядає наступним чином.

Масштабованість для рівня управління SDN, коли масштаб мережі змінюється від N_2 до N_1 , визначається так:

$$\psi(N_2, N_1) = \frac{F(N_2)}{F(N_1)}. \quad (5.22)$$

де $F(N_2)$ – продуктивність рівня управління при обробці запитів від N_2 мережевих елементів, $F(N_1)$ – продуктивність рівня управління при обробці запитів від N_1 мережевих елементів.

Відповідно до існуючих стандартів і рекомендацій можна виділити певний набір запитів, які обробляються на рівні управління SDN: моніторинг і оцінка стану мережі, оновлення мережевої конфігурації і відновлення після збою. При додаванні нових мережевих елементів початковою фазою завжди виступає процес ініціалізації та оновлення інформації про загальну топологію мережі. Найбільший вплив на продуктивність контролерів SDN, а отже, і масштабованість рівня управління SDN надають запити моніторингу та оцінки стану мережі. Таким чином, звернемо увагу на масштабованість рівня управління SDN для обробки потоку ініціалізації. За витрати на розгортання рівня управління візьмемо вартість покупки пристрою контролера.

Порівняємо масштабованість чотирьох типів структур рівня управління. Для простоти $\psi_c(N_1, N_2)$, $\psi_{D,g}(N_1, N_2)$, $\psi_{D,l}(N_1, N_2)$, $\psi_H(N_1, N_2)$ використовуються для позначення масштабованості централізованої структури, глобальної децентралізованої структури, локальної децентралізованої структури та ієрархічної структури, коли кількість хостів варіюється від N_1 до N_2 . Для всіх структур, ми отримуємо $\varphi(N) = N \times (N-1) \times \lambda$, де $\varphi(N)$ – пропускна здатність рівня управління в обробці мережевих запитів. В SDN кількість хостів значно більше, ніж число контролерів. Для простоти припустимо, $N_1 > N_2$. Таким

чином, якщо число $N_2 > N_1 \gg \max\{m_D, m_H\}$, то масштабованість чотирьох типів рівнів управління SDN є наступною.

Масштабованість централізованої структури:

$$\Psi_c(N_1, N_2) \approx \frac{K - N_2^4 \cdot \lambda}{K - N_1^4 \cdot \lambda}. \quad (5.23)$$

Масштабованість глобальної децентралізованої структури:

$$\Psi_{D,g}(N_1, N_2) \approx \frac{K \cdot m_D - N_2^4 \cdot \lambda}{K \cdot m_D - N_1^4 \cdot \lambda}. \quad (5.24)$$

Масштабованість локальної децентралізованої структури:

$$\Psi_{D,l}(N_1, N_2) \approx \frac{K \cdot m_D^4 - N_2^4 (d_D \cdot m_D - d_D + m_D) \lambda}{K \cdot m_D^4 - N_1^4 \cdot \lambda (d_D \cdot m_D - d_D + m_D) \lambda}. \quad (5.25)$$

Масштабованість ієрархічної структури:

$$\Psi_H(N_1, N_2) \approx \frac{K \cdot m_H^4 - N_2^4 (d_H \cdot m_H - d_H + m_H) \lambda}{K \cdot m_H^4 - N_1^4 (d_H \cdot m_H - d_H + m_H) \lambda}. \quad (5.26)$$

Згідно з формулами (5.23 – 5.26) можна побудувати графіки масштабованості різних типів структур рівня управління та порівняти їх масштабованість. Локальна децентралізована структура та ієрархічна структура мають найкращу масштабованість. Тому далі буде досліджено масштабованість цих структур мережі в залежності від кількості контролерів та середньої відстані до контролера.

Масштабованість централізованої структури, глобальної децентралізованої структури, локальної децентралізованої структури та ієрархічної структури в залежності від кількості хостів при кількості контролерів 6 та середньої відстані до контролера 2 показано на рис. 5.13. З графіку видно, що централізована архітектура має найгіршу масштабованість, а локальна децентралізована структура та ієрархічна структури найкращу.

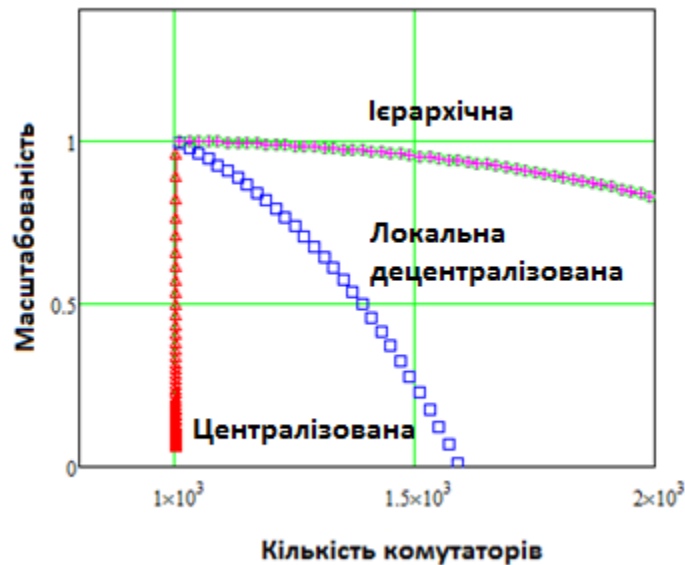


Рис. 5.13. Масштабованість в SDN різних типів структур при $m=6, d=2$

Масштабованість для локальної децентралізованої і ієрархічної структур в залежності від середньої відстані до контролера. Для локальної децентралізованої структури та ієрархічної структури розглянемо зв'язок між масштабованістю і середньою відстанню до контролера.

Якщо число $N_2 > N_1 \gg m_D = m_H$ і $d_D = d_H$, то:

$$\psi_H(N_1, N_2) \approx \psi_{D,l}(N_1, N_2) \gg \psi_{D,g}(N_1, N_2) > \psi_c(N_1, N_2).$$

Нехай через $\psi_{D,l}^d(N_1, N_2), \psi_H^d(N_1, N_2)$ позначимо масштабованість локальної децентралізованої структури і ієрархічної структури з середньою відстанню до контролера d , коли кількість хостів змінюється від N_1 до N_2 . Доведемо, що масштабованість $\psi_{D,l}^d(N_1, N_2)$ і $\psi_H^d(N_1, N_2)$ стає гірше, коли d збільшується.

На рис. 5.14 показана масштабованість локальної децентралізованої структури при кількості контролерів 6 та в залежності від середньої відстані до контролера.

З графіку видно, що масштабованість локальної децентралізованої структури погіршується зі збільшенням середньої відстані до контролера.

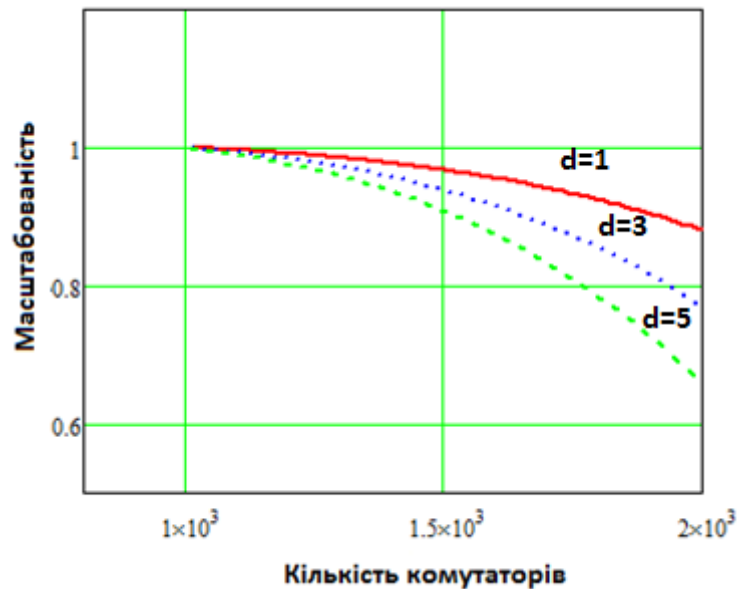


Рис. 5.14 Масштабованість локальної децентралізованої структури з різними значеннями d ($d_1=1$, $d_2=3$, $d_3=5$) при $m=6$

На рис. 5.15 показана масштабованість локальної децентралізованої структури при кількості контролерів 9 та в залежності від середньої відстані до контролера.

З графіку видно, що масштабованість локальної децентралізованої структури погіршується зі збільшенням середньої відстані до контролера, але покращується при збільшенні кількості контролерів.

На рисунках 5.13-5.15 показано, що масштабованість ієрархічної структури і децентралізованої локальної структури стає гірше, коли середня відстань до контролера збільшується, але покращується при збільшенні кількості контролерів.

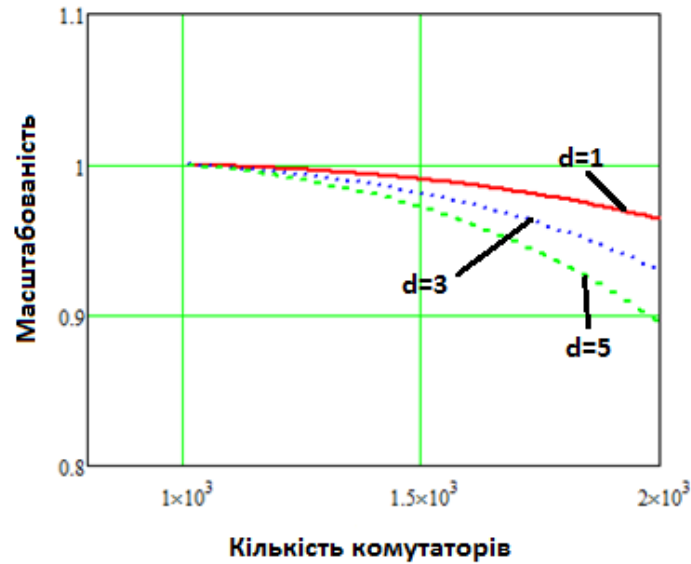


Рис. 5.15 Масштабованість локальної децентралізованої структури з різними значеннями d ($d_1=1, d_2=3, d_3=5$) при $m=9$

Масштабованість ієрархічної та децентралізованої локальної структури рівня управління SDN в разі середньої відстані до контролера шість і більше, значно перевищує масштабованість децентралізованої глобальної структури. Централізована структура має найгірший коефіцієнт масштабованості. При кількості мережевих елементів більше 1000, коефіцієнт масштабованості рівня управління будь-якої структури стрімко зменшується.

5.3.5. Оцінка середньої затримки пакета в мережах SDN

Обчислимо, скільки часу займає доставка пакетів для кожного типу мереж. Топології мереж IP, SDN/OpenFlow, SDN/Overlay зображені на рис. 5.16 – 5.18.

В IP-мережах, загальний час доставки пакетів становить суму затримки в кожному каналі та часу обробки в кожному комутаторі:

$$d_{IP}(p) := m \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{switch}$$

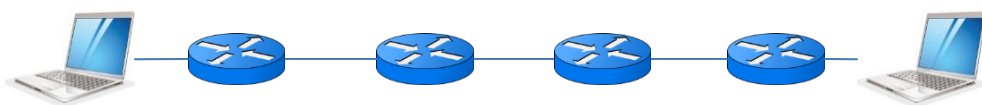


Рис. 5.16. Спрощена топологія IP-мережі

В SDN/OpenFlow-мережах, для оцінки загального часу доставки пакетів до суми затримки в кожному КЗ та часу обробки в кожному комутаторі додається також час доставки інформації про перший пакет до контролера і назад, а також час прийняття рішення контролера:

$$d_{SDN_OFS}(p) := m \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OFS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}.$$

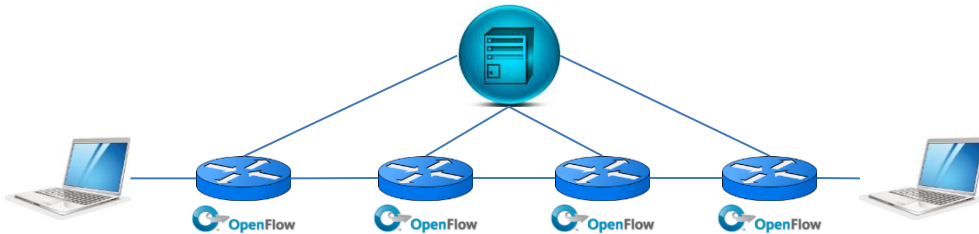


Рис. 5.17. - Спрощена топологія SDN/OpenFlow –мережі

В SDN/Overlay-мережах, загальний час доставки пакетів обраховується так, як і для мереж SDN/OpenFlow, але замість часу обробки OpenFlow-комутатора використовуємо час обробки програмного комутатора Open vSwitch, який враховує час доставки пакета від фізичного до віртуального комутатора і назад:

$$d_{SDN_OVS}(p) := m \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OVS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}.$$

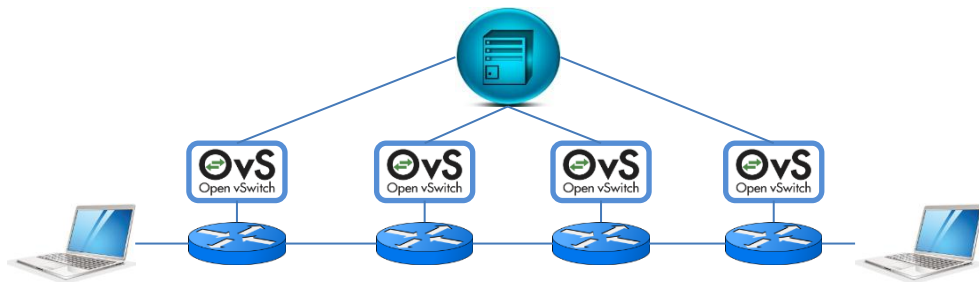


Рис. 5.18. Спрощена топологія SDN/Overlay-мережі

Для обрахунку середньої затримки пакета необхідно загальний час доставки пакетів поділити на кількість пакетів:

$$d_{average_IP}(p) := \frac{m \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{switch}}{p},$$

$$d_{average_SDN_OFS}(p) := \frac{m \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OFS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}}{p},$$

$$d_{average_SDN_OVS}(p) := \frac{m \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OVS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}}{p}$$

Побудуємо залежності загального часу доставки пакетів та середньої затримки від кількості пакетів у потоку даних. Графіки залежностей для трьох типів мереж зображено на рис. 5.19. та 5.20. Графіки побудовані для кількості пакетів від 1 до 1000. Червона суцільна лінія – для IP-мережі, зелена пунктирна – для SDN/Overlay-мережі, лінія з синіх точок – для SDN/OpenFlow-мережі.

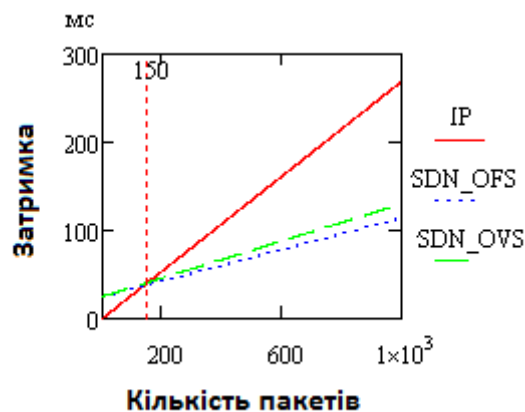


Рис. 5.19. Загальний час передачі даних від кількості пакетів (при $n=4$)

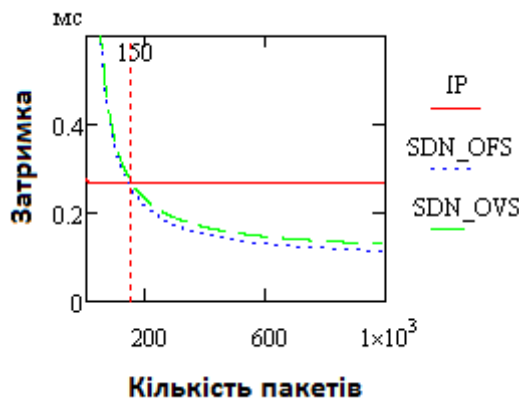


Рис. 5.20. Середня затримка пакета від кількості пакетів (при $n=4$)

З графіків залежностей можна зробити висновок, що середня затримка в SDN мережі зменшується зі збільшенням кількості пакетів у потоці. На середню затримку в традиційних мережах кількість пакетів в потоці не впливає. Отже, підтверджена гіпотеза, що SDN ефективніше використовувати в мережах

з великим об'ємом трафіку. При цьому мережі з OpenFlow-комутаторами мають більшу ефективність функціонування, ніж мережі побудовані на Overlay, як і було зазначено в аналізі переваг підходів до реалізації SDN.

Далі оцінимо, як змінюється затримка в мережі в залежності від кількості мережевого обладнання (комутаторів). Для чистоти оцінок візьмемо кількість пакетів, при якій середня затримка приблизно однакова для всіх мереж. Як видно з графіків, лінії перетинаються приблизно на позначці у 150 пакетів. Отже, зафіксуємо кількість пакетів $p = 150$.

Загальний час передачі даних в залежності від кількості комутаторів представлено залежностями:

$$d_{IP}(n) = (n + 1) \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{switch},$$

$$d_{SDN_OFS}(n) = (n + 1) \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OFS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl},$$

$$d_{SDN_OVS}(n) = (n + 1) \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OVS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}.$$

Середня затримка пакета в залежності від кількості комутаторів виражена відповідно залежностями:

$$d_{average_IP}(n) = \frac{(n + 1) \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{switch}}{p},$$

$$d_{average_SDN_OFS}(n) = \frac{(n + 1) \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OFS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}}{p},$$

$$d_{average_SDN_OVS}(n) = \frac{(n + 1) \cdot t_{link} + n \cdot p \cdot t_{OVS} + 2 \cdot t_{link} + t_{ctrl}}{p}.$$

Побудуємо залежності загального часу доставки пакетів та середньої затримки від кількості комутаторів у мережі. Графіки залежностей для трьох типів мереж зображено на рис. 5.21. та 5.22. Графіки побудовані для кількості комутаторів від 1 до 16.

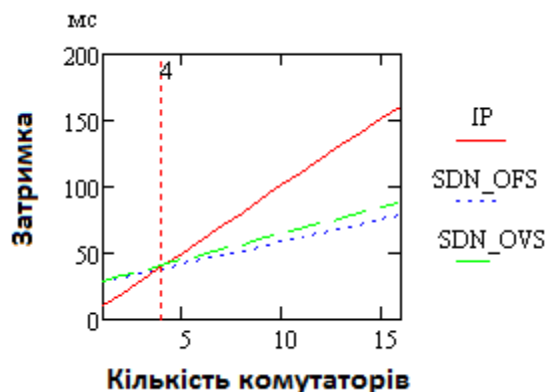


Рис. 5.21. Загальний час передачі даних від кількості комутаторів (при $p=150$)

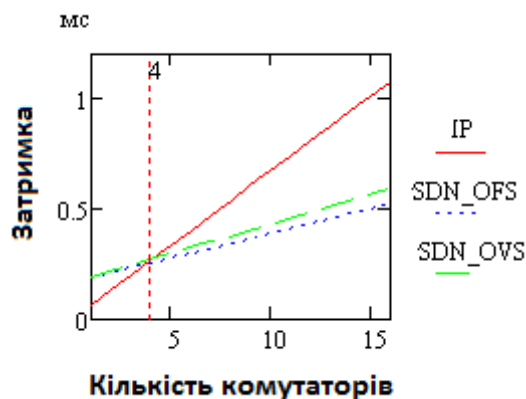


Рис. 5.22. Середня затримка пакета від кількості комутаторів (при $p=150$)

З вищенаведених графіків можна зробити висновок про те, що середня затримка в SDN мережі збільшується зі збільшенням кількості комутаторів набагато повільніше ніж в традиційній мережі. При 16 комутаторах маємо вигреш у затримці більш ніж у 2 рази. Отже, SDN ефективніше використовувати в мережах з великою кількістю мережевого обладнання. Мережі з OpenFlow-комутаторами мають більшу ефективність, ніж мережі побудовані на Overlay.

Висновок до розділу 5

Сукупність положень, отриманих під час проведення досліджень, результати яких викладені у даному розділі, надає можливість сформулювати наступні висновки.

1. У даному розділі була побудована математична модель мережі SDN для різних структур рівня управління. Ефективність функціонування SDN мереж залежить від адаптації контролерів до збільшення інтенсивності запитів, що надходять від комутаторів, і можливості забезпечення належної якості обслуговування при збільшенні масштабів мережі.

2. Підвищити масштабованість рівня управління вдалося за допомогою введення додаткових контролерів, а також зміни структури рівня управління – формування децентралізованої та ієрархічної структур рівня управління. Рішення полягає в розробці розподіленої архітектури SDN такої як Hyperflow, Onix, і Kandoo.

3. Проведено математичні розрахунки в програмному забезпеченні Mathcad, результатами яких є графіки залежностей середньої затримки від кількості пакетів у потоці та кількості комутаторів у мережі. Аналіз отриманих результатів доводить, що використання SDN мереж ефективніше за використання IP мереж при великих об'ємах трафіку та при великій кількості мережевого обладнання. Отже, доведено ефективність використання SDN для великих мереж стільникового зв'язку.

4. Вперше розроблено метод оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі, що використовується для керування мережею стільникового оператора та впровадження нових сервісів, що полягає у послідовному виборі оптимальної архітектури сегменту програмно-конфігурованої мережі, оцінці основних показників її ефективності. Запропонований метод дозволяє проводити більш гнучке та оперативне розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних до 2,1 раза для ієрархічної структури.

5. Результати роботи, висвітлені в даному розділі, опубліковані в [3, 4, 9, 16-21].

Список використаних джерел у п'ятому розділі

1. Смелянский Р. Программно-конфигурируемые сети. *Открытые системы*. 2012. № 09.

2. Орлов С. SDN и другие. *Журнал сетевых решений/LAN*. 2014. № 06.
URL: <https://www.osp.ru/lan/2014/06/13041880/>
3. Одарченко Р.С., Гнатюк С.О., Сидоренко В.М. Аналіз методів розрахунку критичності інформаційних систем. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси*: матеріали доп. учасн. ІХ Міжнародної науково-практичної конференції, 17-18 травня 2016 р. Київ, 2016. С. 284-285
4. Моделирование работы overlay сетей SDN та дослідження їх основних характеристик / Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 284-290.
5. Open Network Foundation: веб-сайт. URL: <https://www.opennetworking.org/>
6. IETF. ovsdb-draft-00: The Open vSwitch Database Management Protocol, August 2012.
7. Das, S., Parulkar, G., and McKeown, N. SDN Based Unified Control Architecture. In *Photonics Conference (IPC)*. 2012. P. 778–779.
8. Infinera Open Transport Switch Product Brochure: веб-сайт. URL: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera-BR-Open-Transport-Switch1.pdf>
9. Odarchenko R. Evaluation of SDN network scalability with different management level structure /R. Odarchenko, O. Tkalich, G. Konakhovych, A. Abakumova// *Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, October 4-6, 2016. – P. 128-131.
10. Постачальник послуг Інтернету: веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Постачальник_послуг_Інтернету.
11. Overview of GSM, GPRS, and UMTS: веб-сайт. URL: http://docstore.mik.ua/univercd/cc/td/doc/product/wireless/moblwrls/cm/mmg_sg/ccmxgs.htm.

12. Schmid S., Suomela J. Exploiting locality in distributed SDN control/ S. Schmid, J. Suomela// Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking. ACM.New York, 2013. P. 121–126.
13. A. Tootoonchian and Y. Ganjali, “Hyperflow: a distributed control plane for openflow,” in Proceedings of the 2010 internet network management conference on Research on enterprise networking. USENIX Association, 2010, pp. 3–3.
14. T. Koponen, M. Casado, N. Gude, J. Stribling, L. Poutievski, M. Zhu, R. Ramanathan, Y. Iwata, H. Inoue, T. Hama et al. Onix. A distributed control platform for large-scale production networks. *OSDI*. Vol. 10. 2010. P. 1–6.
15. S. Hassas Yeganeh, Ganjali Y. Kandoo: a framework for efficient and scalable offloading of control applications. Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks. ACM. 2012. P. 19–24.
16. Одарченко Р.С., Коробка Є.А., Цілевич Є.В., Ткаліч О.П. Особливості керування SDN мережами. *Політ-2014.Сучасні проблеми науки: матеріали доп. учасн. Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 2–3 квітня 2014 р. Київ: НАУ, 2014. С. 132.*
17. Одарченко Р.С., Поліщук В.В. Дослідження переваг та недоліків концепції SDN. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки: матеріали доп. учасн. I Міжнародної науково-технічної конференції, 22 жовтня 2015 р. Київ, 2015. С. 200.*
18. Одарченко Р.С., Даков С.Ю. Недоліки технології SDN та рекомендації по їх усуненню. *Проблеми навігації та управління рухом розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: матеріали доп. учасн. Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 21-23 листопада 2016 р. Київ, 2016. С. 43.*
19. Одарченко Р.С. Моделювання роботи мережі SDN на базі віртуальних комутаторів за технологією Overlay. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: матеріали доп. учасн. Міжнародної науково-практичної конференції, 24-25 березня 2016 р. Кіровоград, 2016. С. 115-116.*

20. Одарченко Р.С., Тирсенко А.М. Методи підвищення ефективності функціонування SDN мережі. *Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем*: матеріали доп. учасн. науково-практичної конференції, 7 – 9 червня 2016 р. Київ, 2016. С. 141-142.

21. Одарченко Р.С., Даков С.Ю., Поліщук В.В., Тирсенко А.М. Моделювання роботи overlay мереж SDN та дослідження їх основних характеристик. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 284-290.

РОЗДІЛ 6

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ПЕРЕДАВАНИХ ДАНИХ В СТІЛЬНИКОВІЙ МЕРЕЖІ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Безпека є одним з основних проблемних місць комунікаційної мережі в даний час. Розгортання жодної мережі не може відбутися без забезпечення гарантованої безпеки для всіх зацікавлених сторін, наприклад, кінцевих користувачів, постачальників послуг, віртуальних операторів, провайдерів інфраструктури.

Разом із еволюцією технологій, що використовуються в стільникових мережах, еволюціонували і їх системи безпеки. Коли були розроблені системи GSM, були стандартизовані й деякі функції безпеки, які враховували недоліки, виявлені у попередніх аналогових систем, та були спрямовані на боротьбу з виникаючими загрозами. З тих часів значного розвитку дістали архітектури стільникових мереж. Паралельно із ними розвивались механізми забезпечення інформаційної безпеки.

На даному етапі розвитку стільникових мереж, кожен користувач будь-якої мережі прагне забезпечити конфіденційність передаваних даних та унеможливити спроби мережевих атак на мобільні пристрої. До того ж набирає популярності концепція IoT, що висуває ще більші вимоги до захисту інформаційної інфраструктури [1, 2].

Проте, як показав аналіз проведений у першому розділі даної дисертаційної роботи, сучасні стільникові мережі вже зовсім не здатні забезпечити завжди безпечну передачу даних.

Таким чином, метою даного розділу було виявлення недоліків систем захисту мереж попередніх поколінь та формування вимог до безпеки майбутніх 5G мереж, їх окремих компонентів, удосконалення механізмів забезпечення інформаційної безпеки. Для досягнення поставленої мети було проведено удосконалення архітектури системи безпеки мереж 5G; проведено удосконалення методу мережецентричного моніторингу кіберінцидентів для використання в стільникових мережах; запропоновано концепцію само-

керованої системи забезпечення мережевої безпеки, а також удосконалено метод виявлення DOS-атак в стільниковій мережі.

6.1. Удосконалення архітектури системи безпеки стільникових мереж нового покоління

В багатьох розвинутих країнах вже є доволі багато операторів, які надають послуги за допомогою мереж LTE, а вже у 2019-2020 роках планується запуск перших мереж п'ятого покоління у повноцінну комерційну експлуатацію.

Кожен користувач будь-якої із вищезазначених мереж прагне забезпечити конфіденційність передаваних даних та унеможливити спроби мережевих атак на мобільні пристрої. Крім того, набирає популярності концепція IoT, що висуває ще більші вимоги до захисту інформаційної інфраструктури. Тому питання підвищення рівня кібербезпеки в стільникових мережах виходить на перший план.

Як показують щорічні звіти [3], інциденти безпеки трапляються у кожній мережі й навіть окремому комп'ютері майже кожного дня. Нинішній ландшафт кіберзагроз значно відрізняється від того, яким він був кілька років тому. Експерти і урядовці погоджуються з тим, що швидкість нападів і їхня складність змінюються радикально. Ще одна важлива різниця полягає в їхньому розмаїтті. Кіберризики загрожують різним сферам людського життя – економічним, політичним або соціальним, які надає людству винахід кіберпростору.

Таким чином, розгортання жодної мережі не повинно відбуватися без забезпечення гарантованої безпеки для всіх зацікавлених сторін (кінцевих користувачів, постачальників послуг, віртуальних операторів, провайдерів інфраструктури). Проте, як показано в [4], архітектури систем безпеки попередніх поколінь вже не здатні в повній мірі забезпечити ці високі вимоги. Тому метою даного підрозділу є удосконалення існуючої архітектури системи безпеки мереж LTE для задоволення вимог до безпеки майбутніх 5G мереж, їх складових.

Архітектура системи безпеки в мережах LTE описана в технічних специфікаціях [5, 6]. Вона включає набір методів, що дозволяють забезпечити безпечний зв'язок між вузлами мережі, конфіденційність і цілісність даних користувача.

Основними складовими, які забезпечує підсистема безпеки LTE є [4]:

- забезпечення рівня конфіденційного не нижче, ніж в мережах 3G;
- підвищений рівень захисту від Інтернет-атак;
- простота переходу від систем безпеки 3G до 4G та 5G;
- можливість подальшого використання програмно-апаратного модуля

USIM (Universal Subscriber Identity Module, універсальна сім-карта).

Що ж стосується мереж п'ятого покоління, то узгоджена архітектура мережі 5G показана на рис. 6.1 згідно [7].

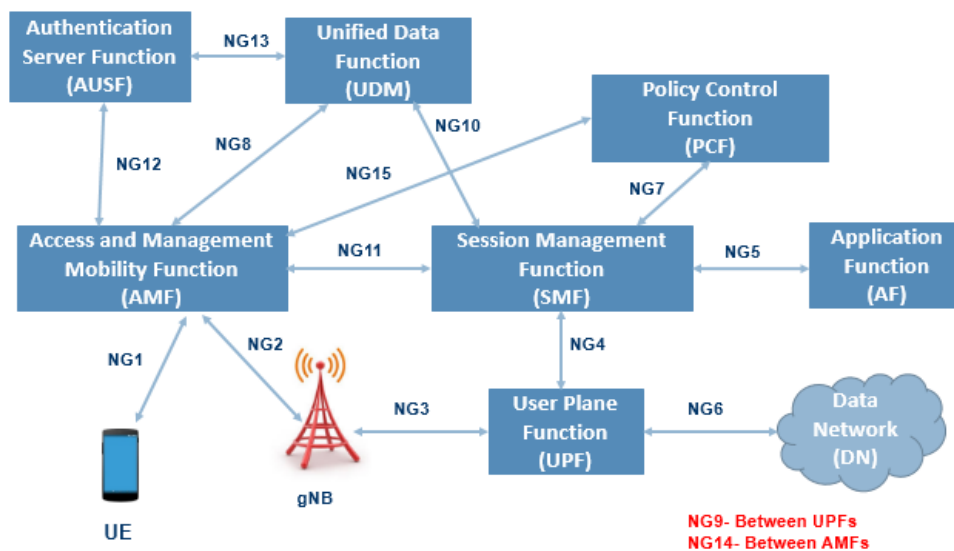


Рис. 6.1. Архітектура мережі 5G

Для представлення архітектури мережі 5G задамо множину мережевих функцій \mathbf{NF} :

$$\{\bigcup_{i=1}^n \mathbf{NF}_i\} = \{\mathbf{NF}_1, \mathbf{NF}_2, \dots, \mathbf{NF}_n\}, \quad (6.1)$$

де $\mathbf{NF}_i \subseteq \mathbf{NF}$, ($i = \overline{1, n}$), n – кількість мережевих функцій, а

$$\mathbf{NF}_i = \{\bigcup_{j=1}^{m_i} \mathbf{NF}_{ij}\} = \{\mathbf{NF}_{i1}, \mathbf{NF}_{i2}, \dots, \mathbf{NF}_{im_i}\}, \quad (6.2)$$

при цьому NF_{ij} ($j = \overline{1, m_i}$) – підмножини мережевих функцій.

Зважаючи на (6.2) запишемо вираз (6.1) наступним чином:

$$\begin{aligned} \{\bigcup_{i=1}^n NF_i\} &= \{\bigcup_{i=1}^n \{\bigcup_{j=1}^{m_i} NF_{ij}\}\} = \\ &= \{\{NF_{11}, NF_{12}, \dots, NF_{1m_1}\}, \{NF_{21}, NF_{22}, \dots, NF_{2m_2}\}, \dots, \\ &\quad \{NF_{n1}, NF_{n2}, \dots, NF_{nm_n}\}\}, (j = \overline{1, m_i}). \end{aligned} \quad (6.3)$$

Наприклад, використовуючи [7], при $n = 7$, згідно виразу (6.1) отримаємо наступне:

$$\begin{aligned} \{\bigcup_{i=1}^7 NF_i\} &= \{NF_1, NF_2, NF_3, NF_4, NF_5, NF_6, NF_7\} = \\ &= \{NF_{AUSF}, NF_{UDMF}, NF_{PCF}, NF_{AMF}, NF_{SMF}, NF_{AF}, NF_{UPF}\} = \\ &= \{AUSF, UDMF, PCF, AMF, SMF, AF, UPF\}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

де $NF_1 = NF_{AUSF} = AUSF$, $NF_2 = NF_{UDMF} = UDMF$, $NF_3 = NF_{PCF} = PCF$, $NF_4 = NF_{AMF} = AMF$, $NF_5 = NF_{SMF} = SMF$, $NF_6 = NF_{AF} = AF$, $NF_7 = NF_{UPF} = UPF$ – мережеві функції з [7]. Опис мережевих функцій та їх під функцій наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Мережеві функції та їх підфункції

Функції	Підфункції
Authentication Server Function (AUSF)	– виконує процеси аутентифікації з обладнання користувача (AUE)
Unified Data Management Function (UDMF)	– сховище облікових даних для перевірки автентичності та функція обробки (ARPF); ця функція зберігає довгострокові облікові дані, що використовуються при автентифікації для АКА (CS) – зберігання інформації про передплату (SSI)
Policy Control Function (PCF)	– підтримка єдиної політичної структури для управління поведінкою в мережі (SSPS) – правила політики контролю площини (функцій), яка їх застосовує (RCP)

Функції	Підфункції
Core Access and Mobility Management Function (AMF)	<ul style="list-style-type: none"> – припинення роботи площини управління мережею радіодоступу (NG2) (SWP) – припинення роботи NAS (NG1), шифрування NAS і захист цілісності даних (SWN) – управління мобільністю (MM) – законне перехоплення (для подій AMF та інтерфейсу системи законного перехоплення виклику) (LI) – прозорі проксі для маршрутизації автентифікації доступу та повідомлень (TP) – автентифікація доступу (AUA) – авторизація доступу (AA) – прив'язка функції безпеки (SEA): Він взаємодіє з UDM та UE, отримує проміжний ключ, який був встановлений в результаті процесу перевірки автентичності UE; у випадку автентифікації на основі USIM, AMF витягує матеріали безпеки з UDM (BSF) – контекстне керування безпекою (SCM): він отримує ключ від SEA, який він використовує для отримання певних ключів доступу до мережі (CSM)
Session Management Control Function (SMF)	<ul style="list-style-type: none"> – управління сесіями (SM) – визначення та керування IP-адресами обладнання користувача (включаючи необов'язкову авторизацію) (DMU) – вибір і контроль функції площини користувача (SCF) – завершення інтерфейсів до стратегічного управління та функцій обліку вартості (CI) – контрольна частина стратегічного виконання QoS (CP) – законне переривання (для подій управління сеансами і інтерфейсу до системи законного переривання) (LIS) – припинення керування сеансом частин повідомлень NAS (TSM) – повідомлення про передачу даних по низхідній лінії зв'язку (DCM) – ініціатор вузла доступу до конкретної інформації про керування сеансом, надсилається через AMF через NG2 до вузла доступу (IAN) – функція роумінгу (RF) – справляється з місцевим здійсненням для застосування служб кваліфікаційного обслуговування (VPLMN) (QS) – збір даних про вартість розмови та білінговий інтерфейс (GD) – законне переривання (в VPLMN для подій управління сеансами і інтерфейсу до системи законного переривання) (LISI)

Функції	Підфункції
Application Function (AF)	– запитує динамічну політику та / або контроль зарядів (DPCC)
User plane Function (UPF)	– управління QoS для площини користувача (MQUP) – маршрутизація та переадресація пакетів (RFP) – пакетна перевірка та дотримання правил політики (BCPC) – законне перехоплення (площина користувача) (LIUP) – облік трафіку та звітність (TAR) – точка прив'язки до мобільності внутрішньої / внутрішньої технології радіодоступу(коли застосовується) (BP) – підтримка взаємодії з зовнішнім даними мережі для транспортування сигналів для авторизації / автентифікації сеансів PDU за допомогою зовнішніх даних мережі (SI)

Використовуючи вираз (6.2), наприклад, при $m_1 = 1$, $m_2 = 2$, $m_3 = 2$, $m_4 = 9$, $m_5 = 13$, $m_6 = 1$, $m_7 = 7$, отримаємо:

$$NF_1 = \left\{ \bigcup_{j=1}^1 NF_{ij} \right\} = \{NF_{1,1}\} = \{NF_{AUSF,1}\} = \{AUSF_{AUE}\} = \{AUE\}, \quad (6.5)$$

де $NF_{1,1} = NF_{AUSF,1} = AUSF_{AUE} = AUE$ – підфункція **AUSF** відповідно до [7] (табл. 6.1).

$$NF_2 = \left\{ \bigcup_{j=1}^2 NF_{ij} \right\} = \{NF_{2,1}, NF_{2,2}\} = \{NF_{UDMF,1}, NF_{UDMF,2}\} = \{UDMF_{CS}, UDMF_{SSI}\} = \{CS, SSI\}, \quad (6.6)$$

де $NF_{2,1} = NF_{UDMF,1} = UDMF_{CS} = CS$, $NF_{2,2} = NF_{UDMF,2} = UDMF_{SSI} = SSI$ – підфункції **UDMF** відповідно до [7] (табл. 6.1).

$$NF_3 = \left\{ \bigcup_{j=1}^2 NF_{ij} \right\} = \{NF_{3,1}, NF_{3,2}\} = \{NF_{PCF,1}, NF_{PCF,2}\} = \{PCF_{SSPS}, PCF_{RCP}\} = \{SSPS, RCP\}, \quad (6.7)$$

де $NF_{3,1} = NF_{PCF,1} = PCF_{SSPS} = SSPS$, $NF_{3,2} = NF_{PCF,2} = PCF_{RCP} = RCP$ – підфункції **PCF** відповідно до [5] (табл. 6.1).

$$\begin{aligned}
 NF_4 &= \left\{ \bigcup_{j=1}^9 NF_{ij} \right\} = \{NF_{4,1}, NF_{4,2}, NF_{4,3}, NF_{4,4}, NF_{4,5}, NF_{4,6}, NF_{4,7}, NF_{4,8}, NF_{4,9}\} = \\
 &\{NF_{AMF,1}, NF_{AMF,2}, NF_{AMF,3}, NF_{AMF,4}, NF_{AMF,5}, NF_{AMF,6}, NF_{AMF,7}, NF_{AMF,8}, NF_{AMF,9}\} = \\
 &\{AMF_{SWP}, AMF_{SWN}, AMF_{MM}, AMF_{LI}, AMF_{TP}, AMF_{AUA}, AMF_{AA}, AMF_{BSF}, AMF_{CSM}\} \\
 &= \quad (6.8) \\
 &\{SWP, SWN, MM, LI, TP, AUA, AA, BSF, CSM\},
 \end{aligned}$$

де $NF_{4,1} = NF_{AMF,1} = AMF_{SWP} = SWP$, $NF_{4,2} = NF_{AMF,2} = AMF_{SWN} = SWN$, ..., $NF_{4,9} = NF_{AMF,9} = AMF_{CSM} = CSM$ – підфункції **AMF** відповідно до [7] (табл. 6.1).

$$\begin{aligned}
 NF_5 &= \left\{ \bigcup_{j=1}^{13} NF_{ij} \right\} = \\
 &\{NF_{5,1}, NF_{5,2}, NF_{5,3}, NF_{5,4}, NF_{5,5}, NF_{5,6}, NF_{5,7}, NF_{5,8}, NF_{5,9}, NF_{5,10}, NF_{5,11}, NF_{5,12}, NF_{5,13}\} \\
 &= \\
 &\{NF_{SMF,1}, NF_{SMF,2}, NF_{SMF,3}, NF_{SMF,4}, NF_{SMF,5}, NF_{SMF,6}, \\
 &NF_{SMF,7}, NF_{SMF,8}, NF_{SMF,9}, NF_{SMF,10}, NF_{SMF,11}, NF_{SMF,12}, NF_{SMF,13}\} = \\
 &\{SMF_{SM}, SMF_{DMU}, SMF_{SCF}, SMF_{CI}, SMF_{CP}, SMF_{LIS}, SMF_{TSM}, \\
 &SMF_{DCM}, SMF_{IAN}, SMF_{RF}, SMF_{QS}, SMF_{GD}, SMF_{LISI}\} = \\
 &\{SM, DMU, SCF, CI, CP, LIS, TSM, DCM, IAN, RF, QS, GD, LISI\},
 \end{aligned} \quad (6.9)$$

де $NF_{5,1} = NF_{SMF,1} = SMF_{SM} = SM$, $NF_{5,2} = NF_{SMF,2} = SMF_{DMU} = DMU$, ..., $NF_{5,13} = NF_{SMF,13} = SMF_{LISI} = LISI$ – підфункції **SMF** відповідно до [7] (табл. 6.1).

$$NF_6 = \left\{ \bigcup_{j=1}^1 NF_{ij} \right\} = \{NF_{6,1}\} = \{NF_{AF,1}\} = \{AF_{DPCC}\} = \{DPCC\}, \quad (6.10)$$

де $NF_{1,1} = NF_{AF,1} = AF_{DPCC} = DPCC$ – підфункція **AF** відповідно до [7] (табл. 6.1).

$$\begin{aligned}
\mathbf{NF}_7 &= \{\mathbf{U}\mathbf{NF}_{ij}\}_{j=1}^7 = \{\mathbf{NF}_{7,1}, \mathbf{NF}_{7,2}, \mathbf{NF}_{7,3}, \mathbf{NF}_{7,4}, \mathbf{NF}_{7,5}, \mathbf{NF}_{7,6}, \mathbf{NF}_{7,7}\} = \\
&\{\mathbf{NF}_{\text{UPF},1}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},2}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},3}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},4}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},5}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},6}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},7}\} = \\
&\{\mathbf{UPF}_{\text{MQUP}}, \mathbf{UPF}_{\text{RFP}}, \mathbf{UPF}_{\text{BCPC}}, \mathbf{UPF}_{\text{LIUP}}, \mathbf{UPF}_{\text{TAR}}, \mathbf{UPF}_{\text{BP}}, \mathbf{UPF}_{\text{SI}}\} = \quad (6.11) \\
&\{\text{MQUP}, \text{RFP}, \text{BCPC}, \text{LIUP}, \text{TAR}, \text{BP}, \text{SI}\},
\end{aligned}$$

де $\mathbf{NF}_{7,1} = \mathbf{NF}_{\text{UPF},1} = \mathbf{UPF}_{\text{MQUP}} = \text{MQUP}$, $\mathbf{NF}_{7,2} = \mathbf{NF}_{\text{UPF},2} = \mathbf{UPF}_{\text{RFP}} = \text{RFP}$, ..., $\mathbf{NF}_{7,7} = \mathbf{NF}_{\text{UPF},7} = \mathbf{UPF}_{\text{SI}} = \text{SI}$ – підфункції **UPF** відповідно до [7] (табл. 6.1).

Використовуючи вираз (6.3) сформуємо значення $m_i (i = \overline{1, n})$. Наприклад для [7] згідно таблиці 1 $i = \overline{1, 7}$, $m_1 = 1$, $m_2 = 2$, $m_3 = 2$, $m_4 = 9$, $m_5 = 13$, $m_6 = 1$, $m_7 = 7$. Якщо в якості **NF** виберемо [7], то $\mathbf{NF} = \mathbf{NF}_{5G}$ і тоді отримаємо:

$$\begin{aligned}
\mathbf{NF}_{5G} &= \{\mathbf{U}\mathbf{NF}_i\}_{i=1}^7 = \{\mathbf{U}\{\mathbf{U}\mathbf{NF}_{ij}\}_{j=1}^{m_i}\} = \{\{\mathbf{NF}_{1,1}\}, \{\mathbf{NF}_{2,1}, \mathbf{NF}_{2,2}\}, \{\mathbf{NF}_{3,1}, \mathbf{NF}_{3,2}\}, \\
&\{\mathbf{NF}_{4,1}, \mathbf{NF}_{4,2}, \mathbf{NF}_{4,3}, \mathbf{NF}_{4,4}, \mathbf{NF}_{4,5}, \mathbf{NF}_{4,6}, \mathbf{NF}_{4,7}, \mathbf{NF}_{4,8}, \mathbf{NF}_{4,9}\}, \\
&\{\mathbf{NF}_{5,1}, \mathbf{NF}_{5,2}, \mathbf{NF}_{5,3}, \mathbf{NF}_{5,4}, \mathbf{NF}_{5,5}, \mathbf{NF}_{5,6}, \mathbf{NF}_{5,7}, \mathbf{NF}_{5,8}, \mathbf{NF}_{5,9}, \mathbf{NF}_{5,10}, \mathbf{NF}_{5,11}, \mathbf{NF}_{5,12}, \mathbf{NF}_{5,13}\}, \\
&\{\mathbf{NF}_{6,1}\}, \{\mathbf{NF}_{7,1}, \mathbf{NF}_{7,2}, \mathbf{NF}_{7,3}, \mathbf{NF}_{7,4}, \mathbf{NF}_{7,5}, \mathbf{NF}_{7,6}, \mathbf{NF}_{7,7}\}\} = \\
&= \{\{\mathbf{NF}_{\text{AUSF},1}\}, \{\mathbf{NF}_{\text{UDMF},1}, \mathbf{NF}_{\text{UDMF},2}\}, \{\mathbf{NF}_{\text{PCF},1}, \mathbf{NF}_{\text{PCF},2}\}, \\
&\{\mathbf{NF}_{\text{AMF},1}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},2}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},3}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},4}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},5}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},6}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},7}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},8}, \mathbf{NF}_{\text{AMF},9}\}, \\
&\{\mathbf{NF}_{\text{SMF},1}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},2}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},3}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},4}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},5}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},6}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},7}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},8}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},9}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},10}, \\
&\mathbf{NF}_{\text{SMF},11}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},12}, \mathbf{NF}_{\text{SMF},13}\}, \{\mathbf{NF}_{\text{AF},1}\}, \\
&\{\mathbf{NF}_{\text{UPF},1}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},2}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},3}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},4}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},5}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},6}, \mathbf{NF}_{\text{UPF},7}\}\} = \quad (6.12) \\
&\{\{\mathbf{AUSF}_{\text{AUE}}\}, \{\mathbf{UDMF}_{\text{CS}}, \mathbf{UDMF}_{\text{SSI}}\}, \{\mathbf{PCF}_{\text{SSPS}}, \mathbf{PCF}_{\text{RCP}}\}, \\
&\{\mathbf{AMF}_{\text{SWP}}, \mathbf{AMF}_{\text{SWN}}, \mathbf{AMF}_{\text{MM}}, \mathbf{AMF}_{\text{LI}}, \mathbf{AMF}_{\text{TP}}, \mathbf{AMF}_{\text{AUA}}, \mathbf{AMF}_{\text{AA}}, \mathbf{AMF}_{\text{BSF}}, \mathbf{AMF}_{\text{CSM}}\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \{SMF_{SM}, SMF_{DMU}, SMF_{SCF}, SMF_{CI}, SMF_{CP}, SMF_{LIS}, SMF_{TSM}, SMF_{DCM}, SMF_{IAN}, SMF_{RF}, \\
& \quad SMF_{QS}, SMF_{GD}, SMF_{LISI}\}, \{AF_{DPCC}\}, \\
& \{UPF_{MQUP}, UPF_{RFP}, UPF_{BCPC}, UPF_{LIUP}, UPF_{TAR}, UPF_{BP}, UPF_{SI}\} = \\
& \quad \{\{AUE\}, \{CS, SSI\}, \{SSPS, RCP\}, \\
& \quad \{SWP, SWN, MM, LI, TP, AUA, AA, BSF, CSM\}, \\
& \quad \{SM, DMU, SCF, CI, CP, LIS, TSM, DCM, IAN, RF, QS, GD, LISI\}, \{DPCC\}, \\
& \quad \{MQUP, RFP, BCPC, LIUP, TAR, BP, SI\}\}.
\end{aligned}$$

В даній архітектурі [7] визначені мережеві функції, на які в тому числі покладено необхідність забезпечення необхідного рівня безпеки передаваних даних. Так, наприклад, мережеві функції безпеки заключаються в наступних функціях [7]:

- AMF:

1) Прозорі проксі для маршрутизації автентифікації доступу та повідомлень SM;

2) Аутентифікація доступу;

3) Авторизація доступу;

4) Функція прив'язки до безпеки (SEA): вона взаємодіє з UDM та UE, отримує проміжний ключ, який був встановлений в результаті процесу перевірки автентичності UE; у випадку автентифікації на основі USIM AMF витягує матеріали безпеки з UDM;

5) Контекстне керування безпекою (SCM): отримує ключ від CEO, який використовується для отримання специфічних ключів доступу до мережі;

- UPF:

1) Пакетна перевірка та дотримання правил політики;

2) Законні перехоплення;

- SMF:

1) Законні перехоплення;

- AUSF:

1) Виконує автентифікаційні процеси з UE;

- UDM:

1) Сховище перевірок автентифікації та функція обробки (ARPF); ця функція зберігає довгострокові облікові дані, що використовуються при автентифікації для АКА.

Як видно із даного аналізу більша частина уваги приділена процедурам аутентифікації та авторизації, проте як було показано в [4], в сучасних стільникових мережах ландшафт кіберзагроз буде значно більш широким, особливо, враховуючи основні драйвери розвитку 5G – концепцію IoT. Тому дуже важливим являється можливість постійного моніторингу стану кібербезпеки стільникових мереж, виявлення атак, усунення їх наслідків тощо. Тому пропонується ввести до вже узгодженої архітектури 5G новий елемент CSF – Cybersecurity function (рис. 1). N_{CS} – інтерфейси зв'язку вищезгаданої функції із іншими мережевими функціями.

Таблиця 6.2

Опис Cybersecurity function

Функція	Підфункції
Cybersecurity function (CSF)	1) збір усієї можливої інформації про виявлені інциденти в мережі (DIN) 2) аналіз, виявлення закономірностей та загальних рис, індикація (ADR) 3) виявлення потенційних та діючих джерел загроз (IST) 4) обмін здобутою інформацією із іншими мережами, наприклад не-3GPP (IE)

Використовуючи вираз (6.3) сформуємо значення $m_i (i = \overline{1, n})$. Наприклад після введення **CSF** для [7], згідно таблиць 1,2 $i = \overline{1, 8}$, $m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 2, m_4 = 9, m_5 = 13, m_6 = 1, m_7 = 7, m_8 = 4$. Якщо в якості **NF** виберемо [7], то $\mathbf{NF} = \mathbf{NF}_{5G}$ і тоді отримаємо:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{NF}_{5G} = \{ \bigcup_{i=1}^8 \mathbf{NF}_i \} = \{ \bigcup_{i=1}^8 \{ \bigcup_{j=1}^{m_i} \mathbf{NF}_{ij} \} \} = \{ \{ \mathbf{NF}_{1,1} \}, \{ \mathbf{NF}_{2,1}, \mathbf{NF}_{2,2} \}, \{ \mathbf{NF}_{3,1}, \mathbf{NF}_{3,2} \}, \\
 \{ \mathbf{NF}_{4,1}, \mathbf{NF}_{4,2}, \mathbf{NF}_{4,3}, \mathbf{NF}_{4,4}, \mathbf{NF}_{4,5}, \mathbf{NF}_{4,6}, \mathbf{NF}_{4,7}, \mathbf{NF}_{4,8}, \mathbf{NF}_{4,9} \}, \\
 \{ \mathbf{NF}_{5,1}, \mathbf{NF}_{5,2}, \mathbf{NF}_{5,3}, \mathbf{NF}_{5,4}, \mathbf{NF}_{5,5}, \mathbf{NF}_{5,6}, \mathbf{NF}_{5,7}, \mathbf{NF}_{5,8}, \mathbf{NF}_{5,9}, \mathbf{NF}_{5,10}, \mathbf{NF}_{5,11}, \mathbf{NF}_{5,12}, \mathbf{NF}_{5,13} \} \},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \{NF_{6,1}\}, \{NF_{7,1}, NF_{7,2}, NF_{7,3}, NF_{7,4}, NF_{7,5}, NF_{7,6}, NF_{7,7}\}, \{NF_{8,1}, NF_{8,2}, NF_{8,3}, NF_{8,4}\} = \\
& = \{ \{NF_{AUSF,1}\}, \{NF_{UDMF,1}, NF_{UDMF,2}\}, \{NF_{PCF,1}, NF_{PCF,2}\}, \\
& \{NF_{AMF,1}, NF_{AMF,2}, NF_{AMF,3}, NF_{AMF,4}, NF_{AMF,5}, NF_{AMF,6}, NF_{AMF,7}, NF_{AMF,8}, NF_{AMF,9}\}, \\
& \{NF_{SMF,1}, NF_{SMF,2}, NF_{SMF,3}, NF_{SMF,4}, NF_{SMF,5}, NF_{SMF,6}, NF_{SMF,7}, NF_{SMF,8}, NF_{SMF,9}, NF_{SMF,10}, \\
& \quad NF_{SMF,11}, NF_{SMF,12}, NF_{SMF,13}\}, \{NF_{AF,1}\}, \\
& \{NF_{UPF,1}, NF_{UPF,2}, NF_{UPF,3}, NF_{UPF,4}, NF_{UPF,5}, NF_{UPF,6}, NF_{UPF,7}\}, \\
& \{NF_{CSF,1}, NF_{CSF,2}, NF_{CSF,3}, NF_{CSF,4}\} \} = \tag{6.12} \\
& \{ \{AUSF_{AUE}\}, \{UDMF_{CS}, UDMF_{SSI}\}, \{PCF_{SSPS}, PCF_{RCP}\}, \\
& \{AMF_{SWP}, AMF_{SWN}, AMF_{MM}, AMF_{LI}, AMF_{TP}, AMF_{AUA}, AMF_{AA}, AMF_{BSF}, AMF_{CSM}\}, \\
& \{SMF_{SM}, SMF_{DMU}, SMF_{SCF}, SMF_{CI}, SMF_{CP}, SMF_{LIS}, SMF_{TSM}, SMF_{DCM}, SMF_{IAN}, SMF_{RF}, \\
& \quad SMF_{QS}, SMF_{GD}, SMF_{LISI}\}, \{AF_{DPCC}\}, \\
& \{UPF_{MQUP}, UPF_{RFP}, UPF_{BCPC}, UPF_{LIUP}, UPF_{TAR}, UPF_{BP}, UPF_{SI}\}, \\
& \{CSF_{DIN}, CSF_{ADR}, CSF_{IST}, CSF_{IE}\} \} = \\
& \{ \{AUE\}, \{CS, SSI\}, \{SSPS, RCP\}, \\
& \{SWP, SWN, MM, LI, TP, AUA, AA, BSF, CSM\}, \\
& \{SM, DMU, SCF, CI, CP, LIS, TSM, DCM, IAN, RF, QS, GD, LISI\}, \{DPCC\}, \\
& \{MQUP, RFP, BCPC, LIUP, TAR, BP, SI\}, \{DIN, ADR, IST, IE\} \}.
\end{aligned}$$

Таким чином, удосконалена архітектура 5G зображена на рис. 6.2.

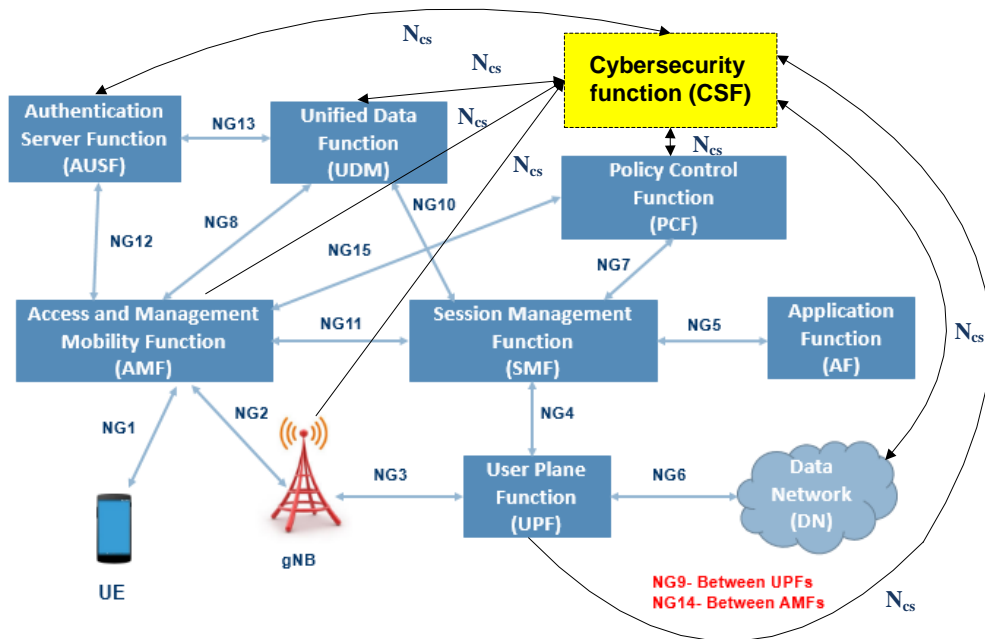


Рис. 6.2. Удосконалена архітектура 5G

Взагалі є варіант впроваджувати на базі вищезгаданої функції загальні принципи, що надаються сучасними CERT [8]:

- сервіси реагування (оповіщення та попередження; обробка інцидентів; аналіз інцидентів; реакція на інциденти; координація реагування на інциденти; реакція на інциденти на місці; обробка вразливостей; аналіз вразливостей; реакція на уразливості; координація реагування на уразливості);

- профілактичні сервіси (оголошення; стеження за розвитком технологій; аналіз і оцінка систем безпеки; конфігурація і підтримка систем безпеки; розробка засобів забезпечення безпеки; виявлення вторгнення; поширення інформації про системи безпеки);

- обробка артефактів (аналіз артефактів ; реакція на артефакт; координація реагування на артефакти);

- управління якістю систем безпеки (аналіз ризиків; безперервність робочого процесу і відновлення при аварійних ситуаціях; консультування з питань безпеки; підвищення обізнаності; навчання / тренінги; оцінка продукту і сертифікація).

Фізично дана концепція може бути реалізована у вигляді Центру моніторингу та реагування на кіберінциденти (центру обробки даних), до якого будуть надходити дані про стан безпеки, кіберінциденти безпосередньо від різноманітних мережевих вузлів (рис. 6.3).

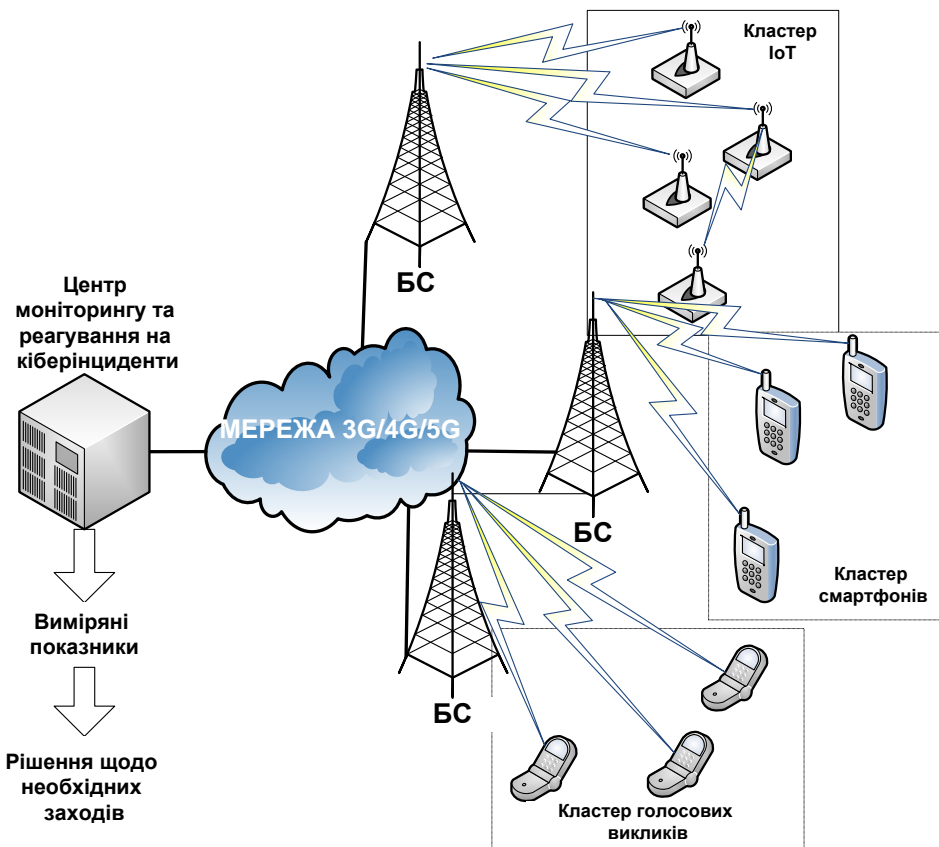


Рис. 6.3. Імплементация Центра мониторингу та реагування на кіберінциденти до мережевої архітектури

6.2. Схеми реалізації концепції мережецентричного моніторингу кіберінцидентів в стільниковій мережі

Протидія виникненню та ліквідації наслідків кіберінцидентів (КБІ) за допомогою засобів, об'єднаних інформаційними мережами в єдину систему включає в себе:

- 1) постійний комп'ютерний моніторинг потенційно небезпечних місць та об'єктів для визначення необхідних заходів щодо ліквідації наслідків кожного виду можливих КБІ;
- 2) здійснення необхідних заходів з підготовки до боротьби з наслідками можливих груп КБІ;
- 3) формування цілей паралельної ліквідації можливих видів КБІ, їх синхронізацію, узгодження і ранжування;
- 4) реалізацію паралельних стратегій цілей, їх синхронізацію і взаємодію використовуваних ресурсів;

5) формування можливого набору паралельних оперативних впливів, їх диспетчеризацію, синхронізацію і маневрування ресурсами в динаміці управління.

Відповідно до [9] у широкому розумінні під моніторингом розуміють систематичне накопичення та обробку даних про стан і динаміку зміни параметрів аналізованого об'єкта або процесу і представлення результатів у зручному для керівника або експерта вигляді.

У динаміці це збір та аналіз даних про втрати від КБІ. МЦ система моніторингу (рис. 6.4) об'єднує засоби моніторингу всіх рівнів і напрямків управління в єдине ціле [10].

Вона повинна забезпечувати доведення всієї необхідної інформації до адресатів в реальному часі або близькому до нього в міру її отримання та, що дуже важливо, використовуючи інформацію, отриману на всіх рівнях і напрямках управління.

При роботі подібних центрів або функції CSF, розглянутої вище, необхідно дотримуватись наступної послідовності дій.

1. В стільниковій мережі відбувається певна подія інформаційної безпеки $E_1 \dots E_f$. Вона може бути спричиненою ненавмисно користувачами різного рівня, або бути наслідком, наприклад, певного типу кібератаки $CA_1 \dots CA_e$.

2. Дані про вищезгадані події передаються на спеціалізовані виділені мережеві сенсори $S_1 \dots S_g$. До кожного сенсора може бути підключена тільки окрема група мережевих пристроїв.

3. Сенсори порівнюють інформацію, що надійшла із відповідним шаблонами, правилами та пороговими значеннями. Після цього дані про ті кіберінциденти $I_1 \dots I_u$, що відбулися передаються до CSF.

4. На основі набору правил реагування на ті чи інші кіберінциденти CSF приймає рішення, яким чином необхідно реагувати.

5. Після усунення КБІ CSF проводить обмін інформацією із мережею CSIRT (як комерційних, так і державних) та мережею CSF одного оператора та між операторами.

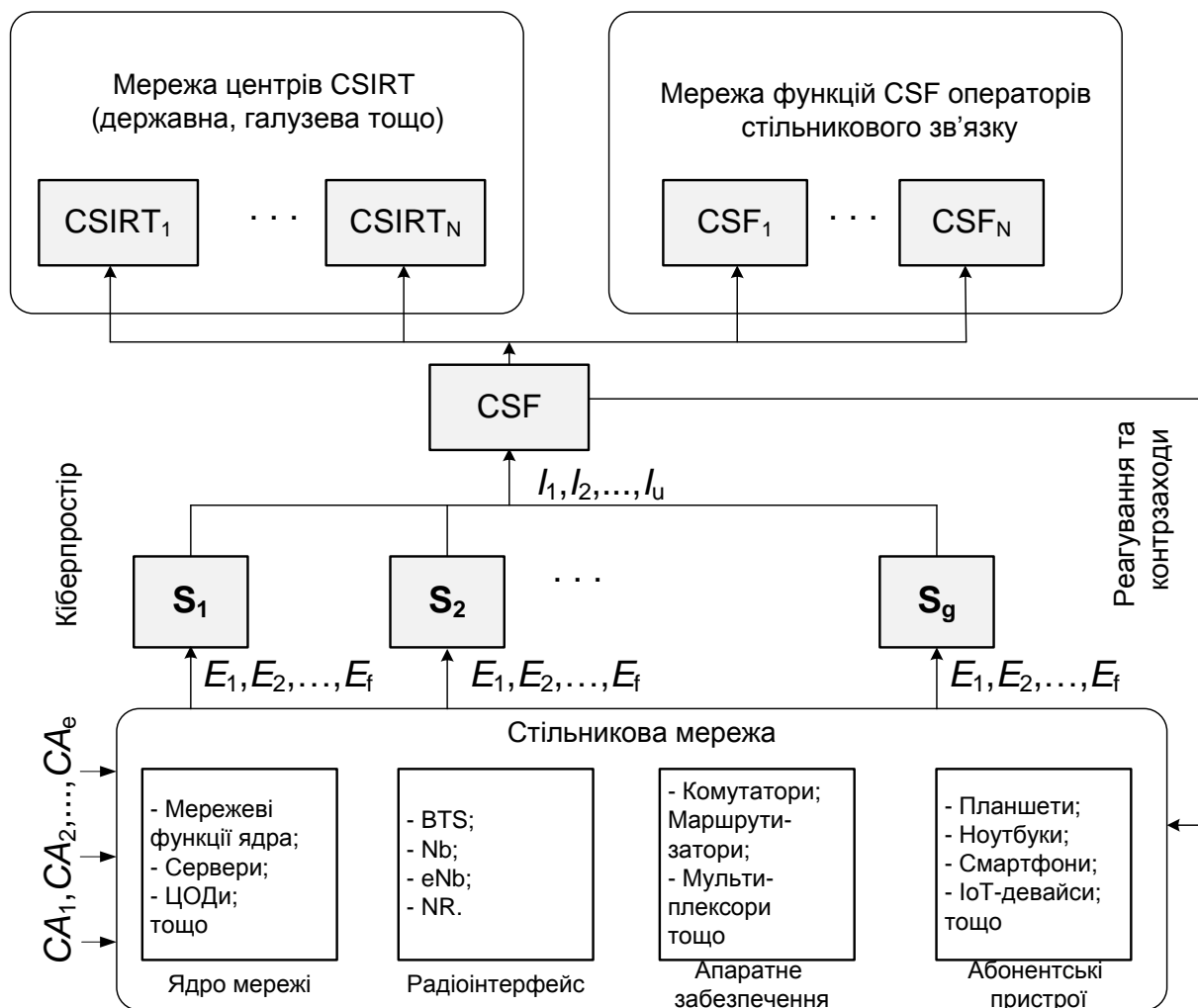


Рис. 6.4. Реалізація мережецентричного моніторингу в стільниковій мережі

На основі вищевикладеної концепції відбувається робота методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в стільниковій мережі (рис. 6.5).

Перший крок алгоритму – збір даних з мережі про виникаючі кіберінциденти з множини $E_1 \dots E_f$, спричинені як спрямованими $CA_1 \dots CA_e$, так і ненавмисними діями, що надходить на *сенсори* $S_1 \dots S_g$. Далі ці інциденти $I_1 \dots I_u$ ідентифікуються за певним набором їх параметрів за допомогою порівняння з відповідними шаблонами. Так визначається тип відомої кібератаки, або ідентифікується поки що невідома.

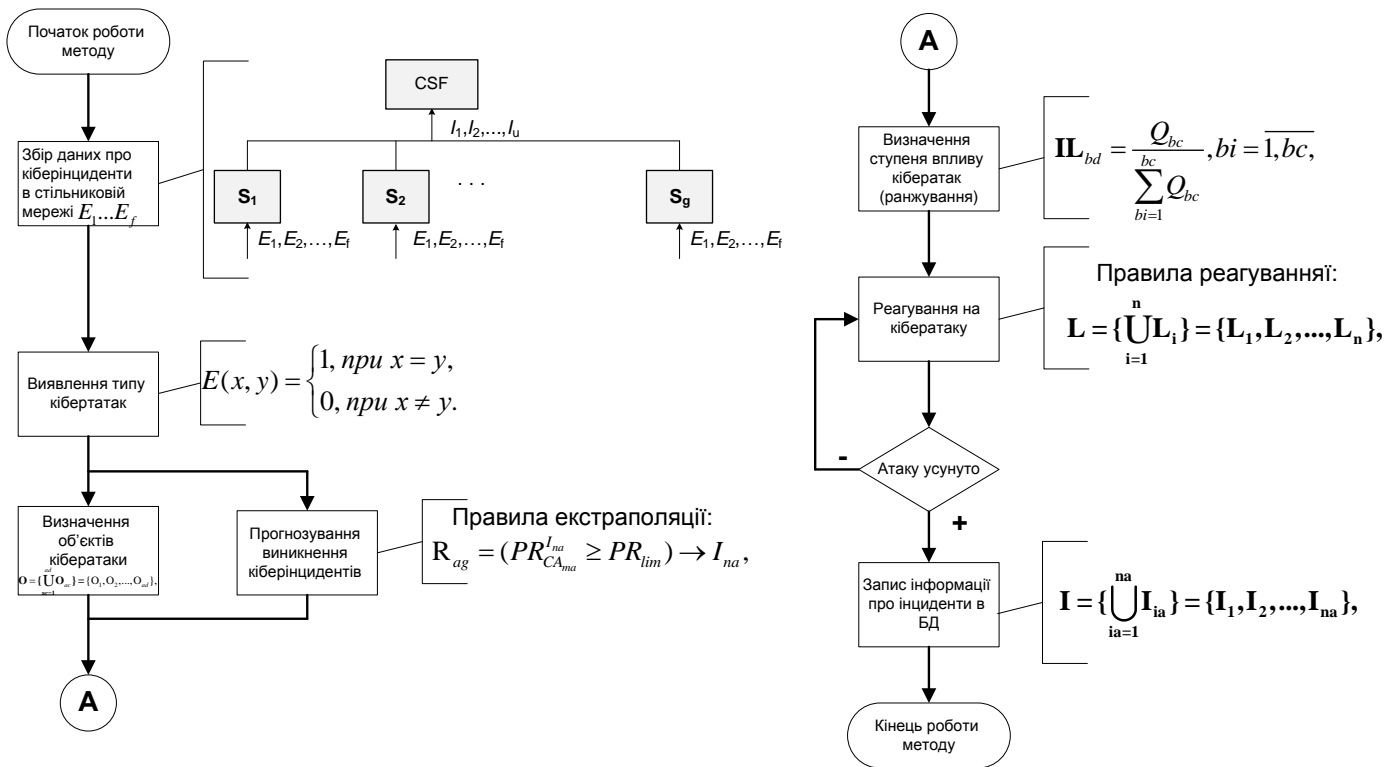


Рис. 6.5. Алгоритм роботи методу

Після цього паралельно відбувається визначення об'єктів, які піддаються впливу інцидентів $\mathbf{O} = \{\bigcup_{ac=1}^{ad} \mathbf{O}_{ac}\} = \{O_1, O_2, \dots, O_{ad}\}$, ($ac = \overline{1, ad}$), а також

формується множина правил екстраполяції $\mathbf{R} = \{\bigcup_{ab=1}^{ag} \mathbf{R}_{ab}\} = \{R_1, R_2, \dots, R_{ag}\}$, ($ab = \overline{1, ag}$), що дозволяють оцінити потенційний вплив кіберінцидентів.

Визначення ступеня впливу кібербезпеки здійснюється за формулою:

$$\Pi_{bd} = \frac{Q_{bc}}{\sum_{bi=1}^{bc} Q_{bc}}, bi = \overline{1, bc},$$

де оцінка порівняльної значущості може бути підрахована за формулою:

$$Q_{bc} = \sum_{bi=1}^{bc} a_{bi} x_{bibj}, bi = \overline{1, bc},$$

де x_{bibj} – значення bi -го критерію bj -го виду КБІ; a_{bi} – «вага» bi -го критерію.

Реагування на кіберінцидент відбувається за правилами із множини $\mathbf{R} = \{\bigcup_{i=1}^n \mathbf{R}_i\} = \{\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n\}$, після чого відбувається перевірка того, чи усунуто наслідки кіберінциденту. Після успішного реагування на кіберінцидент відбувається збереження даних про нього і формується множина таких інцидентів $\mathbf{I} = \{\bigcup_{ia=1}^{na} \mathbf{I}_{ia}\} = \{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_{na}\}$. Ці дані передаються і обробляються в методі захищеного розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж та методі маршрутизації із резервуванням мережевих ресурсів та балансуванням навантаження із урахуванням вимог ІБ.

6.3. Метод оцінки ключових показників захищеності в стільникових мережах

Запропонований метод реалізується у чотири етапи подібно до методу із розділу 2 [11].

Етап 1 – Визначення послуги. Для реалізації цього етапу введемо множину послуг аналіз яких потрібно провести \mathbf{S} :

$$\{\bigcup_{i=1}^n \mathbf{S}_i\} = \{\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_n\}, \quad (6.13)$$

де $\mathbf{S}_i \subseteq \mathbf{S}$, ($i = \overline{1, n}$), n – кількість послуг, а

$$\mathbf{S}_i = \{\bigcup_{j=1}^{m_i} \mathbf{S}_{ij}\} = \{\mathbf{S}_{i1}, \mathbf{S}_{i2}, \dots, \mathbf{S}_{im_i}\}, \quad (6.14)$$

при цьому \mathbf{S}_{ij} ($j = \overline{1, m_i}$) – підмножини елементів системи безпеки.

Зважаючи на (6.14) запишемо вираз (6.13) наступним чином:

$$\begin{aligned} \{\bigcup_{i=1}^n \mathbf{S}_i\} &= \{\bigcup_{i=1}^n \{\bigcup_{j=1}^{m_i} \mathbf{S}_{ij}\}\} = \\ &= \{\{\mathbf{S}_{11}, \mathbf{S}_{12}, \dots, \mathbf{S}_{1m_1}\}, \{\mathbf{S}_{21}, \mathbf{S}_{22}, \dots, \mathbf{S}_{2m_2}\}, \dots, \{\mathbf{S}_{n1}, \mathbf{S}_{n2}, \dots, \mathbf{S}_{nm_n}\}\}, \\ &\quad (j = \overline{1, m_i}). \end{aligned} \quad (6.15)$$

Підмножини показників KQI/KPI $\mathbf{S}_{ij} \subseteq \mathbf{S}_i$ визначимо як:

$$S_{ij} = \left\{ \bigcup_{p=1}^{r_{ij}} S_{ijp} \right\} = \{S_{ij1}, S_{ij2}, \dots, S_{ijr_{ij}}\}, \quad (6.16)$$

де S_{ijp} ($p = \overline{1, r_{ij}}$) – показники, що характеризують елемент системи безпеки S_{ij} ; r_{ij} – кількість таких показників.

Тоді вираз (6.15) з урахуванням (6.16) отримає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \left\{ \bigcup_{i=1}^n S_i \right\} &= \left\{ \bigcup_{i=1}^n \left\{ \bigcup_{j=1}^{m_i} S_{ij} \right\} \right\} = \left\{ \bigcup_{i=1}^n \left\{ \bigcup_{j=1}^{m_i} \left\{ \bigcup_{p=1}^{r_{ij}} S_{ijp} \right\} \right\} \right\} = \\ &= \{ \{ \{ S_{111}, S_{112}, \dots, S_{11r_1} \}, \{ S_{121}, S_{122}, \dots, S_{12r_2} \}, \dots, \{ S_{1m_11}, S_{1m_12}, \dots, S_{1m_1r_{m_1}} \} \}, \\ &\{ \{ S_{211}, S_{212}, \dots, S_{21r_1} \}, \{ S_{221}, S_{222}, \dots, S_{22r_2} \}, \dots, \{ S_{2m_21}, S_{2m_22}, \dots, S_{2m_2r_{m_2}} \} \}, \\ &\dots, \\ &\{ \{ S_{n11}, S_{n12}, \dots, S_{n1r_1} \}, \{ S_{n21}, S_{n22}, \dots, S_{n2r_2} \}, \dots, \{ S_{nm_n1}, S_{nm_n2}, \dots, S_{nm_nr_{m_n}} \} \} \}. \end{aligned}$$

Наприклад, використовуючи класифікацію послуг, відповідно до рекомендації Huawei [12], при $n = 5$, згідно виразу (6.13), отримаємо:

$$\begin{aligned} \left\{ \bigcup_{i=1}^5 S_i \right\} &= \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_{VC}, S_{IA}, S_{MMS/SMS}, S_{VS}, S_{TAR/OAC}\} = \\ &= \{VC, IA, MMS / SMS, VS, TAR / OAC\}, \end{aligned}$$

де $S_1 = S_{VC} = VC$, $S_2 = S_{IA} = IA$, $S_3 = S_{MMS/SMS} = MMS / SMS$, $S_4 = S_{VS} = VS$, $S_5 = S_{OAC} = TAR / OAC$ – послуги відповідно до рекомендації Huawei. Розглянемо детальніше перелік послуг (табл. 6.3).

Таблиця 6.3

Класифікація послуг

Назва послуги	Елемент системи безпеки (Код)	Показники
Голосовий зв'язок Voice Communication VC	Authorization (AUT)	Відсоток невдалих запитів авторизації S_AUT ; час відповіді на невдалу спробу авторизації T_AUT ; час відгуку на запит авторизація TZ_AUT ; max потік запиту авторизації M_AUT ; кількість скарг клієнтів на невдалу спробу авторизації N_AUT

Продовження таблиці 6.3

Назва послуги	Елемент системи безпеки (Код)	Показники
	Authentication (AUTE)	Відсоток невдалих запитів автентифікації S_AUTE ; час відповіді на невдалу спробу автентифікації T_AUTE; час відгуку на запит автентифікації TZ_AUTE; max потік запиту автентифікації M_AUTE; кількість скарг клієнтів на невдалу спробу автентифікації N_AUTE
	Identification (IDE)	Відсоток невдалих запитів ідентифікації S_IDE; час відповіді на невдалу спробу ідентифікації T_IDE; час відгуку на запит ідентифікації TZ_IDE; max потік запиту ідентифікації M_IDE; кількість скарг клієнтів на невдалу спробу ідентифікації N_IDE
	Encryption (ENC)	Швидкість шифрування V_ENC; час відгуку на запит шифрування TZ_ENC
Доступ до мережі Інтернет Internet Access IA	Authorization (AUT)	Відсоток невдалих запитів авторизації S_AUT; час відповіді на невдалу спробу авторизації T_AUT; час відгуку на запит авторизації TZ_AUT; max потік запиту авторизації M_AUT
	Authentication (AUTE)	Відсоток невдалих запитів автентифікації S_AUTE; час відповіді на невдалу спробу автентифікації T_AUTE; час відгуку на запит автентифікації TZ_AUTE; max потік запиту автентифікації M_AUTE
	Identification (IDE)	Відсоток невдалих запитів ідентифікації S_IDE; час відповіді на невдалу спробу ідентифікації T_IDE; час відгуку на запит ідентифікації TZ_IDE; max потік запиту ідентифікації M_IDE
	Encryption (ENC)	Швидкість шифрування V_ENC; час відгуку на запит шифрування TZ_ENC

Закінчення таблиці 6.3

Назва послуги	Елемент системи безпеки (Код)	Показники
MMS/SMS	Authorization (AUT)	Відсоток невдалих запитів авторизації S_AUT; час відповіді на невдалу спробу авторизації T_AUT; час відгуку на запит авторизація TZ_AUT; max потік запиту авторизації M_AUT
	Authentication (AUTE)	Відсоток невдалих запитів автентифікації S_AUTE ; час відповіді на невдалу спробу автентифікації T_AUTE; час відгуку на запит автентифікації TZ_AUTE; max потік запиту автентифікації M_AUTE
	Identification (IDE)	Відсоток невдалих запитів ідентифікації S_IDE ; час відповіді на невдалу спробу ідентифікації T_IDE; час відгуку на запит ідентифікації TZ_IDE; max потік запиту ідентифікації M_IDE
	Encryption (ENC)	Швидкість шифрування V_ENC; час відгуку на запит шифрування TZ_ENC.
Video Streaming VS	Authorization (AUT)	Відсоток невдалих запитів авторизації S_AUT; час відповіді на невдалу спробу авторизації T_AUT; час відгуку на запит авторизація TZ_AUT; max потік запиту авторизації M_AUT
	Authentication (AUTE)	Відсоток невдалих запитів автентифікації S_AUTE ; час відповіді на невдалу спробу автентифікації T_AUTE; час відгуку на запит автентифікації TZ_AUTE; max потік запиту автентифікації M_AUTE
	Identification (IDE)	Відсоток невдалих запитів ідентифікації S_IDE ; час відповіді на невдалу спробу ідентифікації T_IDE; час відгуку на запит ідентифікації TZ_IDE; max потік запиту ідентифікації M_IDE
	Encryption (ENC)	Швидкість шифрування V_ENC; час відгуку на запит шифрування TZ_ENC
Tarification/OAC	Tarification (TAR)	Правильність тарифікації T_TAR

Використовуючи вираз (6.12) та дані з табл. 6.3, наприклад при $m_1 = 4, m_2 = 4, m_3 = 4, m_4 = 4, m_5 = 1$, отримуємо:

$$\begin{aligned} S_1 &= \left\{ \bigcup_{j=1}^4 S_{ij} \right\} = \{S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}\} = \{S_{VC1}, S_{VC2}, S_{VC3}, S_{VC4}\} = \\ &= \{VC_{AUT}, VC_{AUTE}, VC_{IDE}, VC_{ENC}\} = \{AUT, AUTE, IDE, ENC\}, \end{aligned}$$

де $S_{11} = S_{VC1} = VC_{AUT} = AUT$, $S_{12} = S_{VC2} = VC_{AUTE} = AUTE$, $S_{13} = S_{VC3} = VC_{IDE} = IDE$, $S_{14} = S_{VC4} = VC_{ENC} = ENC$ – елементи системи безпеки послуги Voice Communication, відповідно до рекомендацій Huawei (табл. 6.3).

$$\begin{aligned} S_2 &= \left\{ \bigcup_{j=1}^4 S_{ij} \right\} = \{S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}\} = \{S_{IA1}, S_{IA2}, S_{IA3}, S_{IA4}\} = \\ &= \{IA_{AUT}, IA_{AUTE}, IA_{IDE}, IA_{ENC}\} = \{AUT, AUTE, IDE, ENC\}, \end{aligned}$$

де $S_{21} = S_{IA1} = IA_{AUT} = AUT$, $S_{22} = S_{IA2} = IA_{AUTE} = AUTE$, $S_{23} = S_{IA3} = IA_{IDE} = IDE$, $S_{24} = S_{IA4} = IA_{ENC} = ENC$ – елементи системи безпеки послуги Internet Access, відповідно до рекомендацій Huawei (табл. 6.3).

$$\begin{aligned} S_3 &= \left\{ \bigcup_{j=1}^4 S_{ij} \right\} = \{S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}\} = \{S_{MMS/SMS1}, S_{MMS/SMS2}, S_{MMS/SMS3}, S_{MMS/SMS4}\} = \\ &= \{MMS / SMS_{AUT}, MMS / SMS_{AUTE}, MMS / SMS_{IDE}, MMS / SMS_{ENC}\} = \\ &= \{AUT, AUTE, IDE, ENC\}, \end{aligned}$$

де $S_{31} = S_{MMS/SMS1} = MMS / SMS_{AUT} = AUT$, $S_{32} = S_{MMS/SMS2} = MMS / SMS_{AUTE} = AUTE$, $S_{33} = S_{MMS/SMS3} = MMS / SMS_{IDE} = IDE$, $S_{34} = S_{MMS/SMS4} = MMS / SMS_{ENC} = ENC$ – елементи системи безпеки послуги MMS/SMS, відповідно до рекомендацій Huawei (табл. 6.4).

$$\begin{aligned} S_4 &= \left\{ \bigcup_{j=1}^4 S_{ij} \right\} = \{S_{41}, S_{42}, S_{43}, S_{44}\} = \{S_{VS1}, S_{VS2}, S_{VS3}, S_{VS4}\} = \\ &= \{VS_{AUT}, VS_{AUTE}, VS_{IDE}, VS_{ENC}\} = \{AUT, AUTE, IDE, ENC\}, \end{aligned}$$

де $S_{41} = S_{VS1} = VS_{AUT} = AUT$, $S_{42} = S_{VS2} = VS_{AUTE} = AUTE$, $S_{43} = S_{VS3} = VS_{IDE} = IDE$, $S_{44} = S_{VS4} = VS_{ENC} = ENC$ – елементи системи безпеки послуги Video Streaming, відповідно до рекомендацій Huawei (табл. 2).

$$S_5 = \left\{ \bigcup_{j=1}^1 S_{ij} \right\} = \{S_{51}\} = \{S_{\text{TAR/OAC1}}\} = \{\text{TAR / OAC}\},$$

де $S_{51} = S_{\text{TAR/OAC1}} = \text{TAR / OAC}$ – елементи системи безпеки послуги Tarification, відповідно до рекомендацій Huawei (табл. 6.4).

Кожен з елементів системи безпеки характеризується певними показниками (табл. 6.4). Використовуючи вирази (6.13-6.16) сформуємо значення $r_{ij} (i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i})$. Наприклад, відповідно до рекомендацій Huawei, згідно табл. 2, $r_{ij} (i = \overline{1, 5}, m_1 = 4, m_2 = 4, m_3 = 4, m_4 = 4, m_5 = 1)$. Якщо в якості s виберемо множину послуг згідно рекомендацій Huawei, то $S = S_{\text{Huawei}}$, тоді отримаємо:

$$\begin{aligned} S_{\text{Huawei}} &= \left\{ \bigcup_{i=1}^5 S_i \right\} = \left\{ \bigcup_{i=1}^5 \left\{ \bigcup_{j=1}^{m_i} S_{ij} \right\} \right\} = \left\{ \bigcup_{i=1}^5 \left\{ \bigcup_{j=1}^{m_i} \left\{ \bigcup_{p=1}^{r_{ij}} S_{ijp} \right\} \right\} \right\} \\ &= \{ \{ \{ S_{\text{VC},1,1}, S_{\text{VC},1,2}, \dots, S_{\text{VC},1,5} \}, \{ S_{\text{VC},2,1}, S_{\text{VC},2,2}, \dots, S_{\text{VC},2,5} \}, \{ S_{\text{VC},3,1}, S_{\text{VC},3,2}, \dots, S_{\text{VC},3,5} \}, \{ S_{\text{VC},4,1}, S_{\text{VC},4,2} \} \}, \\ &\{ \{ S_{\text{IA},1,1}, S_{\text{IA},1,2}, S_{\text{IA},1,3}, S_{\text{IA},1,4} \}, \{ S_{\text{IA},2,1}, S_{\text{IA},2,2}, S_{\text{IA},2,3}, S_{\text{IA},2,4} \}, \{ S_{\text{IA},3,1}, S_{\text{IA},3,2}, S_{\text{IA},3,3}, S_{\text{IA},3,4} \}, \{ S_{\text{IA},4,1}, S_{\text{IA},4,2} \} \}, \\ &\{ \{ S_{\text{MMS/SMS},1,1}, S_{\text{MMS/SMS},1,2}, S_{\text{MMS/SMS},1,3}, S_{\text{MMS/SMS},1,4} \}, \{ S_{\text{MMS/SMS},2,1}, S_{\text{MMS/SMS},2,2}, S_{\text{MMS/SMS},2,3}, S_{\text{MMS/SMS},2,4} \}, \\ &\{ S_{\text{MMS/SMS},3,1}, S_{\text{MMS/SMS},3,2}, S_{\text{MMS/SMS},3,3}, S_{\text{MMS/SMS},3,4} \}, \{ S_{\text{MMS/SMS},4,1}, S_{\text{MMS/SMS},4,2} \} \}, \\ &\{ \{ S_{\text{VS},1,1}, S_{\text{VS},1,2}, S_{\text{VS},1,3}, S_{\text{VS},1,4} \}, \{ S_{\text{VS},2,1}, S_{\text{VS},2,2}, S_{\text{VS},2,3}, S_{\text{VS},2,4} \}, \\ &\{ S_{\text{VS},3,1}, S_{\text{VS},3,2}, S_{\text{VS},3,3}, S_{\text{VS},3,4} \}, \{ S_{\text{VS},4,1}, S_{\text{VS},4,2} \} \}, \\ &\{ \{ S_{\text{TAR},1,1} \} \} \} = \{ \{ \{ \text{VC}_{\text{AUT},1}, \text{VC}_{\text{AUT},2}, \dots, \text{VC}_{\text{AUT},5} \}, \{ \text{VC}_{\text{AUTE},1}, \text{VC}_{\text{AUTE},2}, \dots, \text{VC}_{\text{AUTE},5} \}, \\ &\{ \text{VC}_{\text{IDE},1}, \text{VC}_{\text{IDE},2}, \dots, \text{VC}_{\text{IDE},5} \}, \{ \text{VC}_{\text{ENC},1}, \text{VC}_{\text{ENC},2} \} \}, \\ &\{ \{ \text{IA}_{\text{AUT},1}, \text{IA}_{\text{AUT},2}, \text{IA}_{\text{AUT},3}, \text{IA}_{\text{AUT},4} \}, \{ \text{IA}_{\text{AUTE},1}, \text{IA}_{\text{AUTE},2}, \text{IA}_{\text{AUTE},3}, \text{IA}_{\text{AUTE},4} \}, \\ &\{ \text{IA}_{\text{IDE},1}, \text{IA}_{\text{IDE},2}, \text{IA}_{\text{IDE},3}, \text{IA}_{\text{IDE},4} \}, \{ \text{IA}_{\text{ENC},1}, \text{IA}_{\text{ENC},2} \} \}, \\ &\{ \{ \text{MMS / SMS}_{\text{AUT},1}, \text{MMS / SMS}_{\text{AUT},2}, \text{MMS / SMS}_{\text{AUT},3}, \text{MMS / SMS}_{\text{AUT},4} \}, \\ &\{ \text{MMS / SMS}_{\text{AUTE},1}, \text{MMS / SMS}_{\text{AUTE},2}, \text{MMS / SMS}_{\text{AUTE},3}, \text{MMS / SMS}_{\text{AUTE},4} \}, \\ &\{ \text{MMS / SMS}_{\text{IDE},1}, \text{MMS / SMS}_{\text{IDE},2}, \text{MMS / SMS}_{\text{IDE},3}, \text{MMS / SMS}_{\text{IDE},4} \}, \\ &\{ \text{MMS / SMS}_{\text{ENC},1}, \text{MMS / SMS}_{\text{ENC},2} \} \}, \\ &\{ \{ \text{VS}_{\text{AUT},1}, \text{VS}_{\text{AUT},2}, \text{VS}_{\text{AUT},3}, \text{VS}_{\text{AUT},4} \}, \{ \text{VS}_{\text{AUTE},1}, \text{VS}_{\text{AUTE},2}, \text{VS}_{\text{AUTE},3}, \text{VS}_{\text{AUTE},4} \}, \\ &\{ \text{VS}_{\text{IDE},1}, \text{VS}_{\text{IDE},2}, \text{VS}_{\text{IDE},3}, \text{VS}_{\text{IDE},4} \}, \{ \text{VS}_{\text{ENC},1}, \text{VS}_{\text{ENC},2} \} \}, \{ \{ \text{TAR / OAC}_{\text{TAR},1} \} \} \} = \end{aligned}$$

$$= \{ \{ \{ \mathbf{AUT}_{S_AUTvc}, \mathbf{AUT}_{T_AUTvc}, \dots, \mathbf{AUT}_{N_AUTvc} \}, \{ \mathbf{AUTE}_{S_AUTvc}, \mathbf{AUTE}_{T_AUTvc}, \dots, \mathbf{AUTE}_{N_AUTvc} \}, \{ \mathbf{IDE}_{S_IDEvc}, \mathbf{IDE}_{T_IDEvc}, \dots, \mathbf{IDE}_{N_IDEvc} \}, \{ \mathbf{ENC}_{V_ENCvc}, \mathbf{ENC}_{TZ_ENCvc} \} \}, \{ \{ \mathbf{AUT}_{S_AUTia}, \mathbf{AUT}_{T_AUTia}, \mathbf{AUT}_{TZ_AUTia}, \mathbf{AUT}_{M_AUTia} \}, \{ \mathbf{AUTE}_{S_AUTEia}, \mathbf{AUTE}_{T_AUTEia}, \mathbf{AUTE}_{TZ_AUTEia}, \mathbf{AUTE}_{M_AUTEia} \}, \{ \mathbf{IDE}_{S_IDEia}, \mathbf{IDE}_{T_IDEia}, \mathbf{IDE}_{TZ_IDEia}, \mathbf{IDE}_{M_IDEia} \}, \{ \mathbf{ENC}_{V_ENCia}, \mathbf{ENC}_{TZ_ENCia} \} \}, \{ \{ \mathbf{AUT}_{S_AUTms}, \mathbf{AUT}_{T_AUTms}, \mathbf{AUT}_{TZ_AUTms}, \mathbf{AUT}_{M_AUTms} \}, \{ \mathbf{AUTE}_{S_AUTEms}, \mathbf{AUTE}_{T_AUTEms}, \mathbf{AUTE}_{TZ_AUTEms}, \mathbf{AUTE}_{M_AUTEms} \}, \{ \mathbf{IDE}_{S_IDEms}, \mathbf{IDE}_{T_IDEms}, \mathbf{IDE}_{TZ_IDEms}, \mathbf{IDE}_{M_IDEms} \}, \{ \mathbf{ENC}_{V_ENCms}, \mathbf{ENC}_{TZ_ENCms} \} \}, \{ \{ \mathbf{AUT}_{S_AUTvs}, \mathbf{AUT}_{T_AUTvs}, \mathbf{AUT}_{TZ_AUTvs}, \mathbf{AUT}_{M_AUTvs} \}, \{ \mathbf{AUTE}_{S_AUTEvs}, \mathbf{AUTE}_{T_AUTEvs}, \mathbf{AUTE}_{TZ_AUTEvs}, \mathbf{AUTE}_{M_AUTEvs} \}, \{ \mathbf{IDE}_{S_IDEvs}, \mathbf{IDE}_{T_IDEvs}, \mathbf{IDE}_{TZ_IDEvs}, \mathbf{IDE}_{M_IDEvs} \}, \{ \mathbf{ENC}_{V_ENCvs}, \mathbf{ENC}_{TZ_ENCvs} \} \}, \{ \{ \mathbf{TAR} \} \} \},$$

де $S_{1,1,1} = S_{VC,1,1} = VC_{AUT,1} = AUT_{S_AUTvc}$, $S_{1,1,2} = S_{VC,1,2} = VC_{AUT,2} = AUT_{T_AUTvc}, \dots$

$S_{n,m_n,r_{m_n}} = S_{5,1,1} = S_{TAR,1,1} = TAR / OAC_{TAR,1} = TAR$ – підмножини показників.

Етап 2 – Визначення показників KPI. Даний етап подібний *Етапу 2 з розділу 2.*

Етап 3 – Оцінка показників KPI. Для реалізації даного етапу проведемо розрахунки для згідно визначених (на етапі 2) KPI, використовуючи відповідні формули (табл. 6.4).

Таблиця 6.4

Розрахунок показників функціонування мережі при надання послуг

Елемент системи безпеки	Показник	Формула для розрахунку
Authorization (AUT) Authentication (AUTE) Identification (IDE)	Відсоток невдалих запитів ідентифікації/авторизації/автентифікації	$S_i = \frac{N_i}{N} \cdot 100\%$, де N_i – к-сть невдалих запитів ідентифікації; N – к-сть загальних запитів; $S_a = \frac{N_a}{N} \cdot 100\%$, де N_a – к-сть невдалих запитів авторизації; N – к-сть загальних

Елемент системи безпеки	Показник	Формула для розрахунку
		запитів; $S_{au} = \frac{N_{au}}{N} \cdot 100\%$, де N_{au} – к-сть невдалих запитів автентифікації; N – к-сть загальних запитів
	час відповіді на невдалу спробу ідентифікації/авторизації/автентифікації	$T_i = T_{i_fail} - T_{i_response}$, де T_{i_fail} – час отримання сповіщення про невдалу спробу ідентифікації; $T_{i_response}$ – час повторної вдалої спроби ідентифікації; $T_a = T_{a_fail} - T_{a_response}$, де T_{a_fail} – час отримання сповіщення про невдалу спробу авторизації; $T_{a_response}$ – час повторної вдалої спроби авторизації; $T_{au} = T_{au_fail} - T_{au_response}$, де T_{au_fail} – час отримання сповіщення про невдалу спробу автентифікації; $T_{au_response}$ – час повторної вдалої спроби автентифікації
	час відгуку на запит ідентифікації/авторизації/автентифікації	$T_i = T_{is} - T_{ir}$, де T_{is} – час відправки запиту на ідентифікацію; T_{ir} – час отримання підтвердження спроби ідентифікації; $T_a = T_{as} - T_{ar}$, де T_{as} – час відправки запиту на авторизацію; T_{ar} – час отримання підтвердження спроби авторизації; $T_{au} = T_{aus} - T_{aur}$, де T_{aus} – час відправки запиту на автентифікації; T_{aur} – час отримання підтвердження спроби автентифікації
	мах потік запиту ідентифікації/авторизації/автентифікації	Оцінюється в залежності від технічних характеристик обладнання стільникової мережі

Елемент системи безпеки	Показник	Формула для розрахунку
Encryption (ENC)	швидкість шифрування	$V = \frac{N_b}{T}$, де T – час шифрування; N_b – кількість біт для шифрування
	час відгуку на запит шифрування	$T_{sh} = T_{shs} - T_{shr}$, де T_{shs} – час відправки запиту на початок шифрування; T_{shr} – час отримання підтвердження запиту шифрування

Для прикладу, нехай кількість невдалих запитів авторизації $N_a = 7$, загальна кількість запитів $N = 90$, тоді, відповідно до формули (табл. 6.5),

$$S_a = \frac{N_a}{N} \cdot 100\% = \frac{7}{90} \cdot 100\% = 7.8\% .$$

Етап 4 – Порівняння показників з гранично допустимими значеннями.

На даному етапі отримані значення порівнюємо з гранично допустимими, можливими для забезпечення нормального функціонування мережі. Якщо ці значення перевищують допустимі, необхідно провести аналіз пристроїв які функціонують в стільниковій мережі та виявити причини невідповідності отриманих значень.

Для порівняння отриманих значень в результаті розрахунків з гранично допустимими введемо логічну функцію еквівалентності:

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > y, \\ 0, & \text{при } x \leq y. \end{cases} \quad (6.17)$$

В результаті буде визначено робота якого елемента або елементів системи безпеки не відповідає вимогам.

Наприклад, використовуючи граничні значення показників (табл. 6.5) згідно виразу (6.17) здійснюємо порівняння з розрахованими значеннями (етап 3).

Граничні значення показників, при оцінці елементів безпеки

Тип наданих послуг	Відсоток невдалих запитів		Час відповіді на невдалу спробу		Час відгуку на запит	
	Нормальний рівень	Високий рівень	Нормальний рівень	Високий рівень	Нормальний рівень	Високий рівень
Ідентифікація	6%	4%	1 с.	0.6 с.	10 с.	5 с.
Автентифікація	6%	4%	1 с.	0.6 с.	10 с.	5 с.
Авторизація	6%	4%	1 с.	0.6 с.	10 с.	5 с.
Шифрування					10 с.	5 с.

В результаті буде визначено робота якого елемента або елементів мережі не відповідає вимогам, зазначеним в SLA та, відповідно, можуть бути застосовані заходи для приведення їх у відповідність до встановлених норм.

6.4. Концепція само-керованих систем забезпечення мережевої безпеки

Після того, як світ вступив в сферу IoT з появою нових сервісів та пристроїв (наприклад, самокеровані автомобілі), які потребують наднадійного зв'язку виникла необхідність відмовитись від традиційних архітектур надання мережевого доступу. Так, виникло поняття самокерованої мережі. Самокерована мережа представляє собою покращення концепції SDN. Тут вже контролер не приймає рішення на основі потреб додатків, а самостійно навчається, використовуючи штучний інтелект. Ці заходи дозволяють значно пришвидшити роботу мережевих пристроїв, проте виникає нова проблема – вона пов'язана із інформаційною безпекою.

Тепер виникає необхідність створення чогось подібного і в даній предметній області. Тому в рамках даного дисертаційного дослідження пропонується концепція само-керованої системи забезпечення мережевої безпеки (рис. 6.6).

Ця система має включати в себе два основні рівні (шари): контролер мережевої безпеки, до функцій якого входить керування всією мережевою безпекою, та мережеві пристрої або додатки, які забезпечують безпечну передачу даних в мережі. Зв'язом між цими двома шарами відбувається за допомогою набору правил – протоколу OpenFlowSec (по аналогії з OpenFlow із концепції SDN). Кожен такий мережевий елемент має бути оснащений вбудованим сенсором – тобто має бути здатним забезпечувати передачу даних про кіберінциденти, характеристики мережі тощо. Ці дані будуть передаватись до мережевого контролера. Він же в свою чергу буде зберігати їх в спеціалізованій базі даних, яка для підвищення рівня захищеності буде синхронізована із хмарною базою даних.

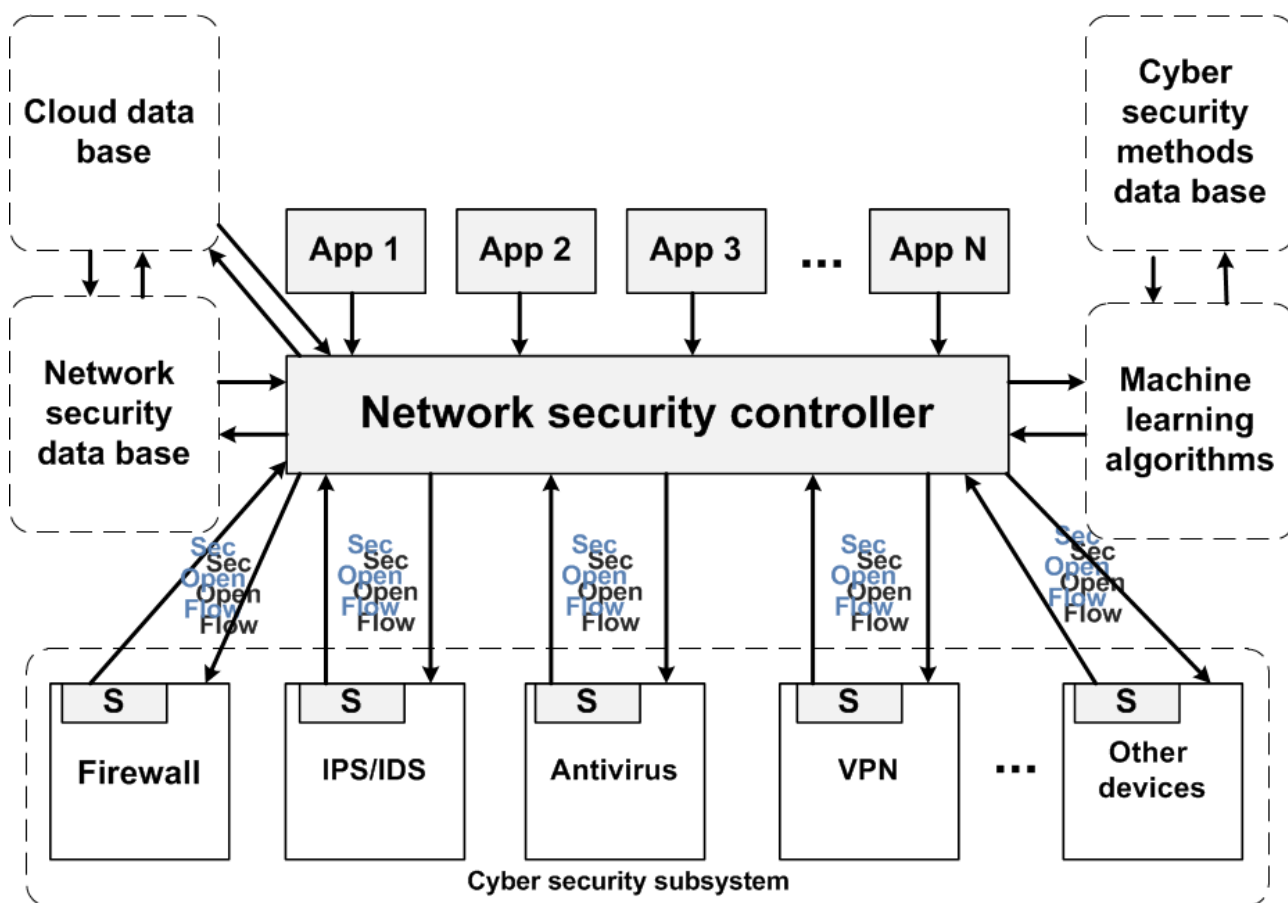


Рис. 6.6. Концепція само-керованої системи забезпечення мережевої безпеки

Яким чином налаштувати безпекові мережеві елементи контролер приймає рішення на основі виконання алгоритмів машинного навчання. Так, який метод необхідно обрати для захисту інформації, контролер обирає за

допомогою машинного навчання із спеціалізованої бази даних. Одним із таких методів може бути представлений нижче удосконалений метод виявлення аномалій в безпроводовій мережі.

6.5. Удосконалений метод виявлення аномалій в безпроводовій мережі

Розглянемо характерні ознаки трафіку і визначимо показники, які ми можемо зчитувати з мережевого інтерфейсу пристрою, що знаходиться в уже згадуваному сегменті мережі.

Ознаки, на основі яких ми зробимо класифікацію пакетів:

- тип мережевого протоколу;
- тип транспортного протоколу;
- напрямок передачі даних;
- значення полів заголовка, специфічних для протоколу.

На основі цієї класифікації розраховуються дані показники для подальшого аналізу:

- загальна кількість трафіку по протоколам (IP, TCP, ICMP і ін.);
- кількість TCP-трафіку з прапорами SYN, FIN, RST;
- кількість ICMP-трафіку типів Echo Request, Destination Unreachable.

Для вимірювання показників і їх подальшої обробки нам необхідно виконати перехоплення пакетів з мережі. Потім, отримані після перехоплення пакети необхідно класифікувати і аналізувати показники за допомогою математичної статистики.

При обробці показників для виявлених потенційних загроз необхідно вибирати такі параметри трафіку, які будуть інваріанти до зміни величин легального трафіку, але будуть чутливі до появи атак [13].

Після того, як виявлено певну атаку, центр моніторингу кіберінцидентів буде вживати відповідних заходів у відповідності до алгоритму, запропонованого в даному розділі.

Параметри показників інформаційної безпеки

Показник	Пояснення	Використання
$R_{IP}=V_{in}/V_{out}$	Відношення вхідного і вихідного трафіку	Підвищення обсягу вхідного трафіку без підвищення обсягу вихідного трафіку може говорити про потенційну атаку
$R_{PSH}=N_{PSH}/N_{TCP}$	Відносна частка прапорця PSH у вхідних пакетах	Даний показник відображає ефективність передачі даних
$R_{EC}=N_{PSH}/(N_{TCP}-N_{PSH})$	Відношення, що характеризує ступінь корисного завантаження каналу	Показник падає при SYN-flood і підвищується при TCP-flood
$d_{ACK}=N_{out} - N_{in}$	Різниця між кількістю вхідних і вихідних ACK-прапорів в трафіку TCP	Виявлення атак, подібних SYN-flood і HTTP-flood
$R_{DU}=N_{ICMP,3}/N_{IP}$	Співвідношення, що показує відносну частку пакетів Destination Unreachable в трафіку.	Виявлення сканерів адрес і портів
$R_{ICMP}=N_{ICMP}/N_{IP}$	Відносна частка службових пакетів.	Визначення різних мережеских аномалій, пов'язаних з використанням протоколу ICMP
$R_{SYN}=N_{TCP,SYN}/N_{TCP}$	Відносна частота TCP-пакетів з прапором SYN	Визначення SYN flood.
$L=T_{IP}/N_{IP}$	Середня довжина IP-пакета	Визначення різних атак класу DDoS.

Висновки до розділу 6

Сукупність положень, сформульованих в рамках написання даного розділу, надала можливість зробити наступні висновки.

1. Безпека є одним з основних проблемних місць стільникових мереж в даний час. Розгортання жодної мережі не може відбутися без забезпечення гарантованої безпеки для всіх зацікавлених сторін. Тому в даному розділі було запропоновано декілька покращень для систем безпеки стільникових мереж наступних поколінь.

2. Таким чином, було запропоновано удосконалену архітектуру мереж 5G. Було запропоновано ввести до складу стільникової мережі новий елемент CSF – Cybersecurity function, та запропоновано його функціонал. Як показано у роботі, дана функція може бути реалізована у вигляді Центру моніторингу та реагування на кіберінциденти, до якого будуть надходити дані про стан безпеки, кіберінциденти тощо безпосередньо від різноманітних мережевих вузлів. Робота даного центру буде відбуватись на основі методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти.

3. Тому було вперше розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, який полягає в удосконаленні архітектури стільникових мереж зв'язку шляхом введення додаткових безпекових функцій та послідовному зборі інформації про виникнення кіберінцидентів в стільниковій мережі, виявленні типів кібератак, об'єктів та ступеня впливу, реагування на кібератаку та збереження інформації про кіберінцидент в спеціалізовану базу даних. Запропонований метод дозволяє режимі реального часу проводити моніторинг стану забезпечення кібербезпеки та підвищувати її рівень, а відповідно й ефективність функціонування мережі.

4. Для безперервного керування безпековими функціями стільникових мереж було запропоновано концепцію само-керованої системи забезпечення мережевої безпеки, яка надає змогу на основі алгоритмів штучного інтелекту в режимі реального часу керувати мережевими функціями, які відповідають за мережеву безпеку.

5. В якості прикладу одного із алгоритмів, які можуть бути застосовані за вище розглянутою концепцією, було представлено метод швидкого виявлення різних типів атак у мережі стільникового оператора.

6. Результати роботи, отримані в даному розділі, опубліковані в [1, 2, 4, 9-11, 13-18].

Список використаних джерел у шостому розділі

1. Александер М.Б., Корченко О. Г., Карпінський М.П., Одарченко Р.С. Дослідження вразливостей сенсорних підмереж архітектури Інтернету речей до різних типів атак. *Безпека інформації*. 2016. Т. 22. №1 С. 12-19

2. Корченко О.Г., Александер М.Б., Одарченко Р.С., Абду Ахмад Алі Наджі, Петренко О.Ю. Аналіз загроз та механізмів забезпечення інформаційної безпеки в сенсорних мережах *Захист інформації*. 2016. Т.18. №1. С. 48-56.

3. Отчет Cisco по информационной безопасности за первое полугодие 2017 г.: веб-сайт. URL: https://www.cisco.com/c/ru_ru/about/press/press-releases/2017/07-21.html

4. Одарченко Р.С., Гнатюк В.О. Концептуальні засади підвищення рівня кібербезпеки сучасних стільникових мереж. *Захист інформації*. 2016. Вип. 22 (2). С. 143-149

5. 3GPP System Architecture Evolution (SAE); Security architecture 3GPP TS 33.401

6. 3GPP System Architecture Evolution (SAE); Security aspects of non-3GPP accesses 3GPP TS 33.402

7. Study on Architecture for Next Generation System 3GPP TR 23.799

8. Пошаговое руководство по созданию CSIRT: веб-сайт. URL: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjJioOjibLYAhXFF5oKHU16CbgQFgg5MAI&url=https%3A%2F%2Fwww.enisa.europa.eu%2Fpublications%2Fcsirt-setting-up-guide-in-russian%2Fat_download%2FfullReport&usg=AOvVaw1FWJwHZcCOqYoUaqEPKZFb

9. Одарченко Р.С., Гнатюк В.О., Коберник А. Ю., Федюра Т.В. Розробка системи управління кіберінцидентами в мережах LTE. *Безпека інформації*. 2018. № 2. Т.24. С. 84-90.

10. Одарченко Р.С., Гнатюк В.О., Коберник А. Ю., Федюра Т.В. Розробка системи управління кіберінцидентами в мережах LTE. *Безпека інформації*. 2018. № 2. Т.24. С. 84-90.
11. Одарченко Р.С., Скульська О.Ю., Гнатюк В.О. Метод оцінки ключових показників захищеності в сучасних стільникових мережах. *Безпека інформації*. 2017. № 1(23). С. 19-26.
12. KPI Reference Issue: веб-сайт. URL: <https://www.slideshare.net/abdeyehia3/huaweiltekpiref>.
13. Zaliskyi M., Odarchenko R., Gnatyuk S., Petrova Y., Chaplits A. Method of traffic monitoring for DDoS attacks detection in e-health systems and networks / M. Zaliskyi, R. Odarchenko, S. Gnatyuk, Y. Petrova, A. Chaplits// Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies, Yekaterinburg, Russia, November 15, 2017.
14. Одарченко Р.С. Зростання вимог до забезпечення інформаційної безпеки новітніх інформаційно-комунікаційних мереж. *ITSEC*: матеріали доп. учасн. V Міжнародної науково-технічної конференції, 15-16 травня 2015 р. Київ, 2015. С. 103-105.
15. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Мачалін І.О. Удосконалення систем безпеки безпроводових мереж нових поколінь. *Стан та удосконалення безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем SITS-2015*: матеріали доп. учасн. VII Всеукраїнської науково-практичної конференції, 09-12 червня 2015 р. Коблево, 2015. –С. 52-53.
16. Одарченко Р.С., Гнатюк С.О. Принципи формування вимог до систем безпеки мереж 5G. *Кібербезпека в Україні*: матеріали доп. учасн. Всеукраїнської науково-практичної конференції, 21 жовтня 2016 р. Одеса, 2016. С. 160-161.
17. Одарченко Р.С., Дика Н.В., Абакумова А.О., Гнатюк В.О. Удосконалена архітектура системи безпеки мережі стільникового оператора нового покоління. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту

інформації: матеріали доп. учасн. IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 21-24 лютого 2018 р.: К.:, 2018. С.107-110.

18. Удосконалена архітектура системи безпеки стільникових мереж нового покоління / Р.С.Одарченко, В.О. Гнатюк В.О., Є.О.Самойлик, В.В. Котелянець // Наукоємні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія [за ред. В. В. Баранніка, В. М. Безрука] – Х. : Видавництво «Стиль-видат», 2018. – С. 293-302.

РОЗДІЛ 7

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА

З метою перевірки адекватності всіх розроблених в дисертаційному дослідженні методів та моделей, з метою об'єднання їх в методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж, в даному розділі були проведені експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання, що дозволило оцінити ефективність запропонованих рішень.

7.1. Моделювання роботи мережі радіодоступу стільникового оператора

7.1.1. Узагальнене налаштування та первинні вимірювання

Моделювання радіопокриття відбувалось в програмному середовищі Atoll. Atoll пропонує можливість використання і прогнозів, і справжніх мережевих даних в процесах планування та оптимізації [1]. Мережеві дані (такі як KPI, вимірювання, зняті з МС та драйв-тести) дозволяють краще прогнозувати зріст трафіку, визначати «гарячі точки» (місця з високим трафіком) та калібрувати моделі розповсюдження радіохвиль. Мережеві дані також можуть бути використанні для керування оптимізаційними алгоритмами модулів автоматичного планування стільників та частотного розподілу.

Наразі для моделювання використаємо схему підключення feederless з товщиною фідера 7/8 і довжиною в 50м. Зупинимося на них більш детально.

Site (назва БС) – Test NodeB.

Transmitter (назва передавача) – Test NodeB_UMTS_1...3.

Antenna (тип антени) – 2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt (більш детально вище).

Height (висота) – 40 м.

Azimuth (кут між напрямом на північ і напрямом антени) – 0, 120 і 240 градусів.

Mechanical Downtilt (механічний кут нахилу) – 0 градусів.

Feeder Equipment (7/8" Feeder) – тип фідеру.

Transmission length (довжина фідеру) – 50 м.

Transmission losses (втрати в фідері, розраховуються автоматично в залежності від довжини і товщини фідера) – 3,5 dB.

Main Propagation Model (модель розповсюдження радіохвиль) – Лонглі-Райса для першого, Хата для другого моделювання.

Main Calculation Radius (радіус від БС, в якому проводиться розрахунок) – 35000 м.

Main Resolution (ширина і довжина пікселя, має бути не більше ніж розширення карти) – 20 м.

Site	Transmitter	Active	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Mechanical Downtilt (°)	Feeder Equipment	Transmissi on Feeder Length (m)	Transmissi on losses (dB)	Main Propagation Model	Main Calculation Radius (m)	Main Resolution (m)
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	40	0	0	7/8" Feeder	50	3,5	Longley-Rice	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	40	120	0	7/8" Feeder	50	3,5	Longley-Rice	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	40	240	0	7/8" Feeder	50	3,5	Longley-Rice	35 000	20
*		<input type="checkbox"/>										

Рис. 7.1. Параметри базової станції для моделювання

Виконавши моделювання, було отримано карти покриття БС. Карта покриття і легенда цієї карти зображена на рис. 7.2. Зелений колір відповідає рівню покриття більше -100 dBm. Менші рівні сигналу (блакитний і синій кольори можна не брати до уваги, так як рівень сигналу дуже малий для приймача МС). Змодельоване покриття показує, що сигнал розповсюджується на відстані до 8 км від БС. Відомо, що покриття від БС UMTS з частотою 2100 МГц зазвичай не перевищує 3 км від БС за умов прямої видимості. Тому зрозуміло, що модель Лонглі-Райса для діапазону 2100 МГц і міської забудови не є правдоподібною.

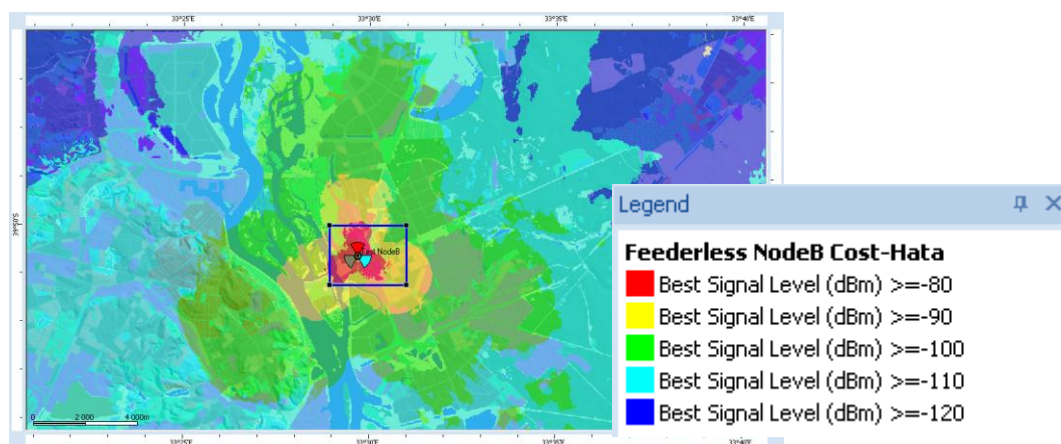


Рис. 7.2. Покриття, розраховане за моделлю Лонглі-Райса

Карти покриття, розраховані за моделлю Cost 231 зображені на рис. 7.3. З карти покриття видно, що рівень сигналу більше -100 dBm досягається не далі ніж на відстані в 1,7 км. В умовах щільної забудови міста Києва така відстань є реалістичною, отже цю модель можна визнати правдоподібною для даного діапазону частот і міської забудови.

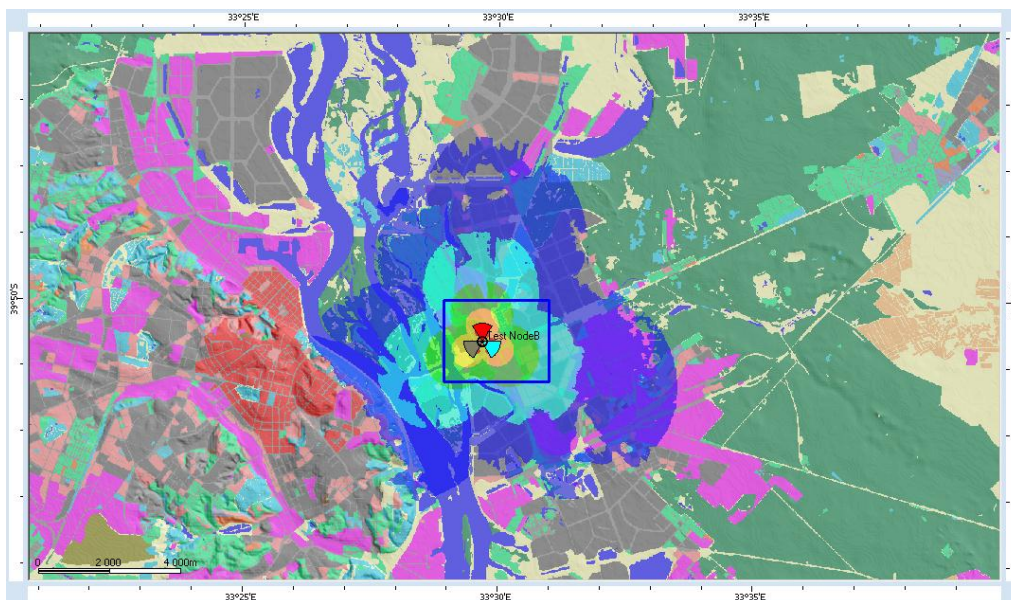


Рис. 7.3. Покриття, розраховане за моделлю Хата Cost-231

7.1.2. Моделювання покриття однієї базової станції

Для визначення, на скільки покращиться покриття БС при використанні запропонованого методу оптимізації БС проведемо моделювання для трьох підходів до підключення антен до радіомодулів: feederline, feederless та з використанням активних антен.

Feederline підключення є більш застарілим, але все ще дуже часто використовується операторами для побудови БС. При використанні feederline використовується товстий фідер 7/8'' з меншим затуханням (параметри фідера показані на рис. 7.4). При цьому довжина фідера більше ніж висота антени, так як радіомодулі знаходяться на деякій відстані від опори (в моделюванні – 16 м). При цьому висота підвісу UMTS антени на 6 м нижче, ніж при використанні мультистандартних антен, адже антени необхідно встановлювати під вже існуючими GSM антенами. Для моделювання використаємо висоту в 34 м.

Загальна довжина фідера для feederline складе 50 м (34 м – висота антени та 16 м – відстань від опори). Параметри для моделювання БС з підключенням feederline показані на рис. 7.5.

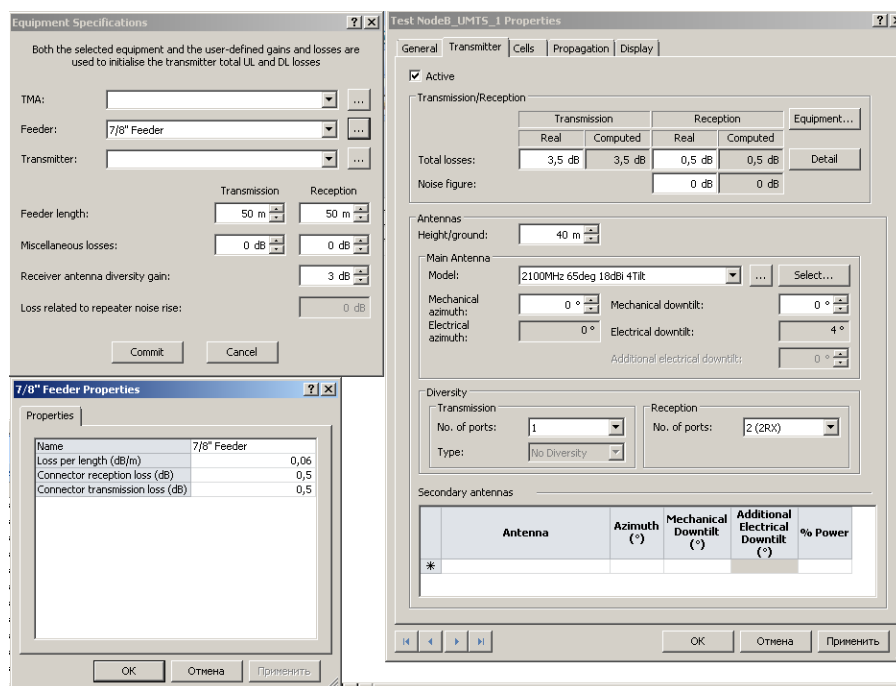


Рис. 7.4. Налаштування для фідера 7/8”

Site	Transmitter	Active	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Feeder Equipment	Transmission Feeder Length (m)	Transmission losses (dB)	Main Propagation Model	Main Calculation Radius (m)	Main Resolution (m)
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	0	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	120	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	240	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	35 000	20
*		<input type="checkbox"/>									

Рис. 7.5. Параметри для моделювання при feederline підключенні RRU

Feederless підключення RRU до антен новіше, і також часто використовується операторами для побудови БС. При використанні feederless радіомодулі встановлюються на опорі ближче до антени. При цьому використовується тонший фідер 1/2” з більшим затуханням, ніж фідер 7/8” (параметри на рис. 7.6), але при цьому він більш гнучкий і зручний для монтажу. Довжина фідера порівняно мала і складає в моделюванні 6 м. Висоту підвісу антен було обрано рівною 34 м. Параметри для моделювання БС з підключенням feederline показані на рис 7.7.

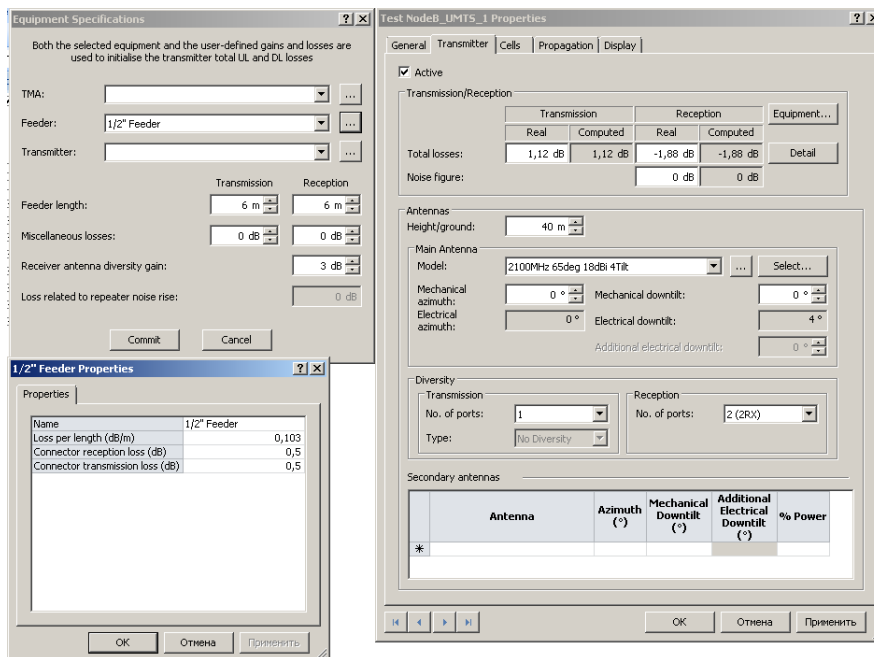


Рис. 7.6. Налаштування для фідера 1/2"

Site	Transmitter	Active	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Feeder Equipment	Transmission on Feeder Length (m)	Transmission on losses (dB)	Main Propagation Model	Main Calculation Radius (m)	Main Resolution (m)
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	0	1/2" Feeder	6	1,12	Cost-Hata	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	120	1/2" Feeder	6	1,12	Cost-Hata	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	240	1/2" Feeder	6	1,12	Cost-Hata	35 000	20
*		<input type="checkbox"/>									

Рис. 7.7. Параметри для моделювання при feederless підключенні RRU

При використанні запропонованого методу до побудови БС фідер не використовується взагалі, тому що RRU вмонтований в антену. При цьому висоту підвісу антени можна зробити такою ж, як і висота вже встановлених антен старіших стандартів. Для даного моделювання візьмемо висоту на 6 м вище, порівняно з попередніми двома підходами, тобто 40 м. Параметри для моделювання вказані на рис. 7.8.

Site	Transmitter	Active	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Feeder Equipment	Transmission on Feeder Length (m)	Transmission on losses (dB)	Main Propagation Model	Main Calculation Radius (m)	Main Resolution (m)
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	40	0		0	0	Cost-Hata	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	40	120		0	0	Cost-Hata	35 000	20
Test NodeB	Test NodeB_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	40	240		0	0	Cost-Hata	35 000	20
*		<input type="checkbox"/>									

Рис. 7.8. Параметри для моделювання для антен з вмонтованими RRU

Побудовані прогнози для прийнятого рівня сигналу (карти покриття) при використанні всіх трьох підходів вказані на рис. 7.9. Добре видно, що при

використанні feederless підключення, покриття краще, ніж при feederline. При використанні запропонованого методу оптимізації БС площа покриття ще більша, ніж при feederless підключенні.

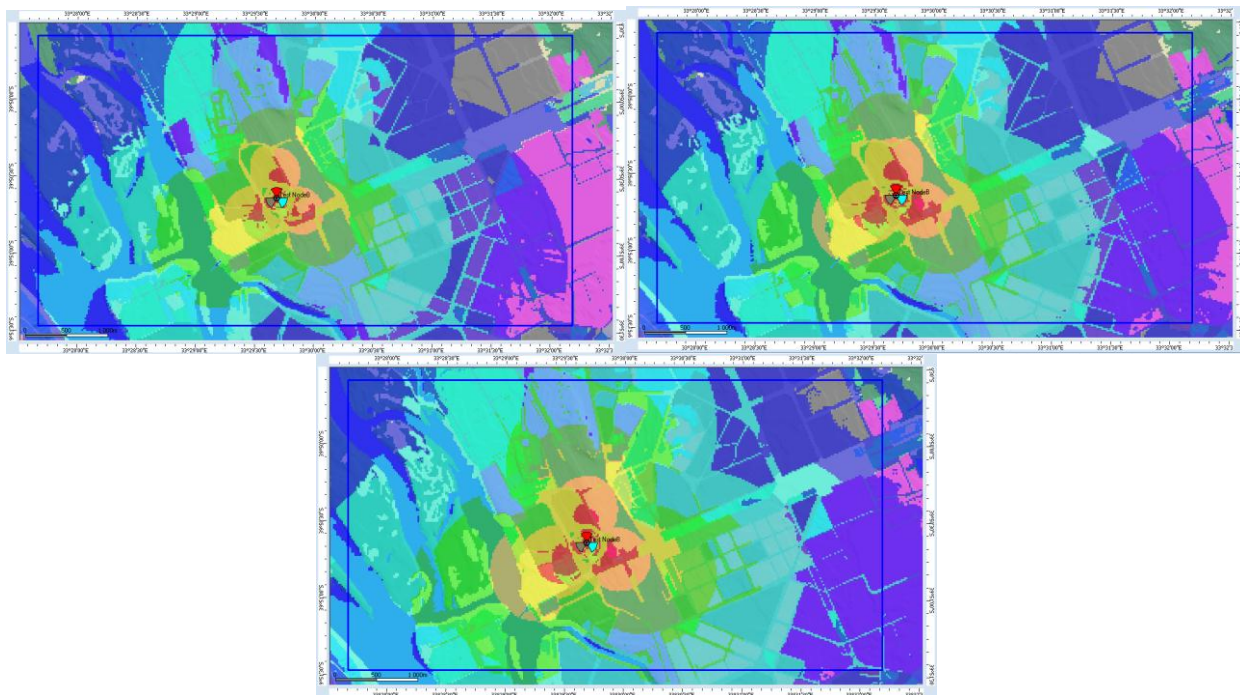


Рис. 7.9. Порівняння покриття при використанні feederline (зліва зверху), feederless (зправа зверху) та запропонованому методу оптимізації (посередині)

Крім того, що збільшилася площа покриття взагалі, також покращилася і якість зв'язку. Так можна сказати, адже збільшилася не тільки площа «зеленого» покриття на рівні -100 dBm, а й площа «жовтого» і «червоного» покриття з рівнями -90 dBm і -80 dBm відповідно. При більшому рівні сигналу мережа мобільного оператора пропонує кращий сервіс, тобто більшу швидкість передачі даних, завдяки можливості використовувати менш завадостійкі, а отже більш швидкі методи модуляції.

Щоб зрозуміти, наскільки кількісно збільшилася площа покриття, скористаємося вбудованою в Atoll функцією побудови гістограм. Отримаємо три гістограми для кожної з карт покриття, які зображені на рис. 7.10.

Оцінимо, на скільки відсотків збільшилася площа покриття при використанні оптимізованого підходу до побудови БС в порівнянні з двома більш застарілими підходами. Площа покриття для кожного рівня прийнятого

сигналу вказана в таблиці справа від гістограми. Щоб визначити загальну площу покриття просумуємо площу покриття на «зеленому», «жовтому» і «червоному» рівнях. Загальна площа покриття для feederline підключення складає:

$$3,35+1,05+0,15=4,5 \text{ км}^2.$$

Для feederless підключення:

$$4,34+1,39+0,81=6,54 \text{ км}^2.$$

Для оптимізованої архітектури:

$$5,64+2+0,37=8,01 \text{ км}^2.$$

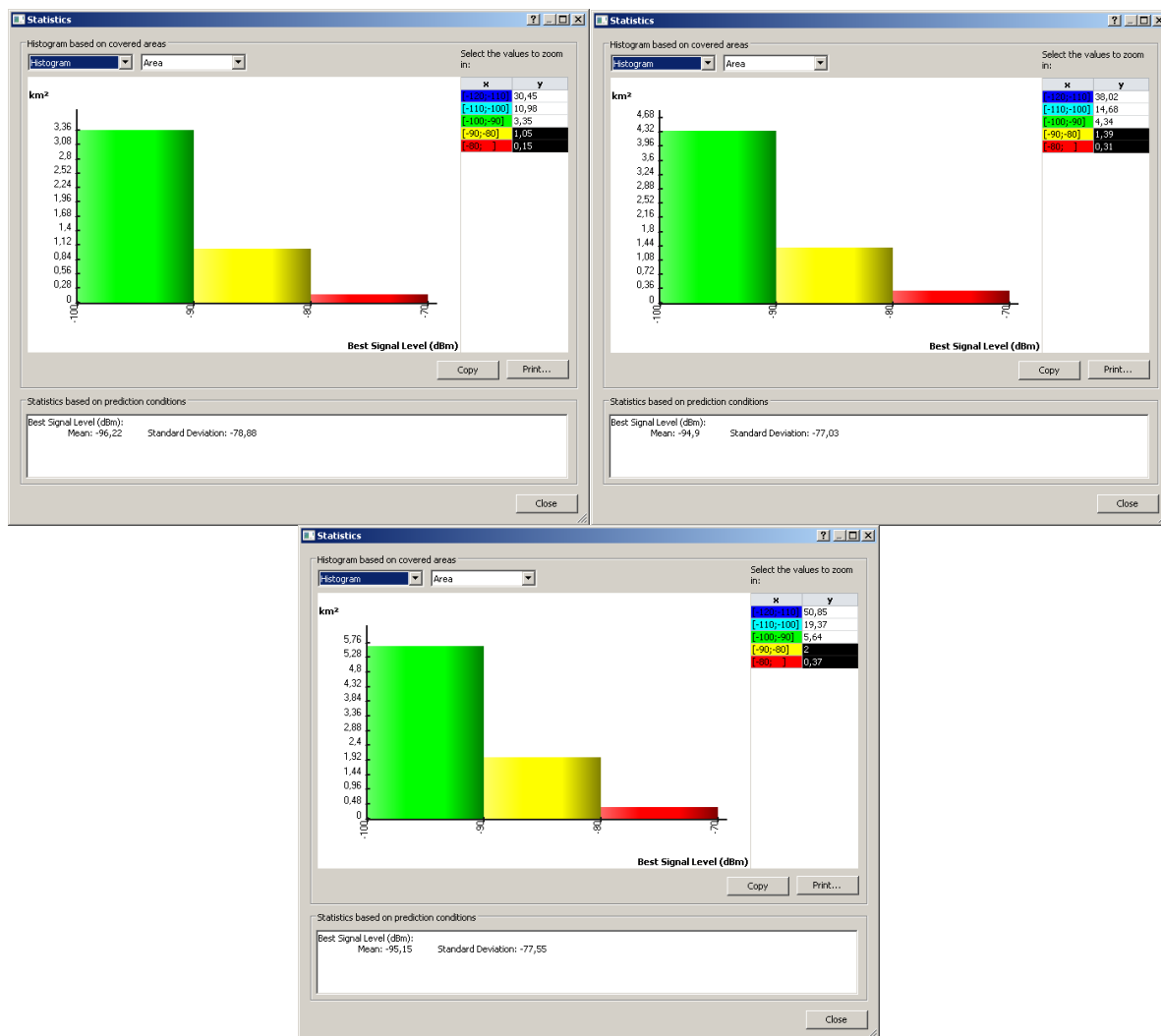


Рис. 7.10. Гістограми, що показують площу покриття при різних рівнях прийнятого сигналу

Отже площа покриття однієї БС при запропонованому методі побудови БС у порівнянні з feederline підключенням покращилася на:

$$\Delta = \frac{8,01 - 4,5}{4,5} \cdot 100\% = 78\%.$$

Площа покриття однієї БС при запропонованому методі побудови БС у порівнянні з feederless підключенням покращилася на

$$\Delta = \frac{8,01 - 6,54}{6,54} \cdot 100\% = 22\%.$$

Отримані результати не повністю співпадають, але дуже схожі на результати математичного моделювання з попереднього розділу 2, де було отримано на 80% більшу площу в порівнянні з feederline і на 39% в порівнянні з feederless підключеннями. Математичне моделювання не враховувало рельєф та типи місцевостей, було більш спрощеним, тому результати моделювання в Atoll є більш правдоподібними. Але моделювання в Atoll було прив'язано до конкретної місцевості, а саме щільної міської забудови міста Києва. Ми можемо очікувати значно більшого покращення в площі покриття оптимізованої БС порівняно з іншими підходами, якщо проведемо таке моделювання в приміській або сільській місцевостях.

7.1.3. Моделювання покриття кластеру базових станцій

Моделювання роботи однієї БС є більш показовим з точки зору порівняння площі покриття оптимізованої БС та сучасних БС мобільних операторів. Але необхідно також провести моделювання в більш реальних умовах – з кількома БС, щоб побачити як саме зміниться покриття, якщо застосувати даний підхід в реальній мережі оператора.

Для моделювання більш масштабної мережі на карті було розміщено 9 БС з різною кількістю секторів, як показано на рис. 7.11.

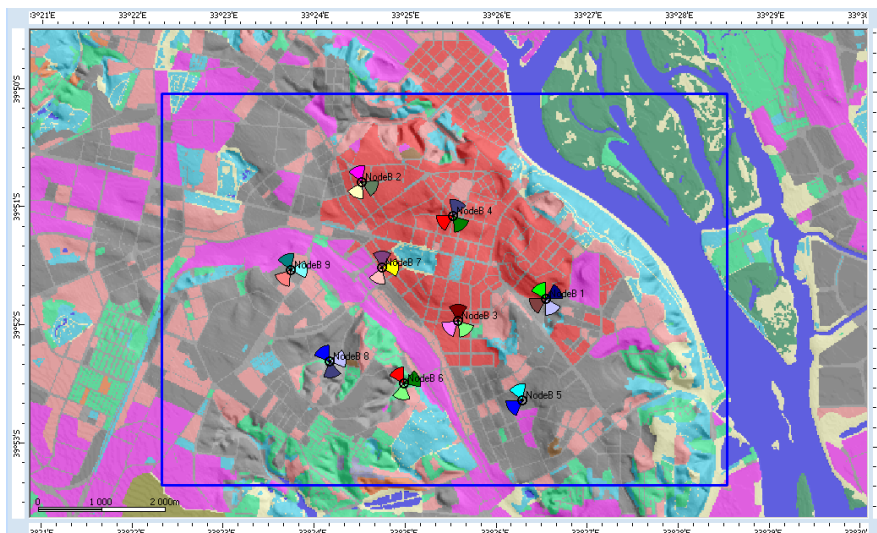


Рис. 7.11. Приклад частини мережі радіодоступу мобільного оператора

Для моделювання використовувалися майже ті ж параметри, що й в попередньому випадку. Механічний кут нахилу антен було встановлено на 2 градуси, замість 0 градусів, щоб БС менше заважали одна одній при роботі. Був зменшений радіус розрахунку до 5 км, так як з минулого моделювання було зрозуміло, що цього достатньо. Якщо залишити радіус розрахунку 35 км, то час обчислення в декілька разів зростає, що особливо критично для не потужних комп'ютерних систем. Детальніше параметри моделювання на прикладі підключення feederline вказані на рис 7.12.

Site	Transmitter	Active	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Mechanical Downtilt (°)	Feeder Equipment	Transmission on Feeder Length (m)	Transmission losses (dB)	Main Propagation Model	Main Calculation Radius (m)	Main Resolution (m)
NodeB 1	NodeB 1_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	60	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 1	NodeB 1_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	150	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 1	NodeB 1_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	240	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 1	NodeB 1_UMTS_4	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	330	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 2	NodeB 2_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	340	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 2	NodeB 2_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	115	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 2	NodeB 2_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	205	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 3	NodeB 3_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	0	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 3	NodeB 3_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	140	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 3	NodeB 3_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	230	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 4	NodeB 4_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	18	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 4	NodeB 4_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	140	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 4	NodeB 4_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	240	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 5	NodeB 5_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	235	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 5	NodeB 5_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	340	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 6	NodeB 6_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	330	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 6	NodeB 6_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	70	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 6	NodeB 6_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	190	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 7	NodeB 7_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	0	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 7	NodeB 7_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	90	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 7	NodeB 7_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	200	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 8	NodeB 8_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	325	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 8	NodeB 8_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	80	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 8	NodeB 8_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	170	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 9	NodeB 9_UMTS_1	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	340	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 9	NodeB 9_UMTS_2	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	88	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
NodeB 9	NodeB 9_UMTS_3	<input checked="" type="checkbox"/>	2100MHz 65deg 18dBi 4Tilt	34	220	2	7/8" Feeder	50	3,5	Cost-Hata	5 000	20
*		<input type="checkbox"/>										

Рис. 7.12. Параметри для моделювання мережі радіодоступу (на прикладі feederline підключення)

Результати моделювання з кластером БС показані на рис. 7.13 (зверху – feederline підключення, посередині feederless підключення, знизу – оптимізована БС).

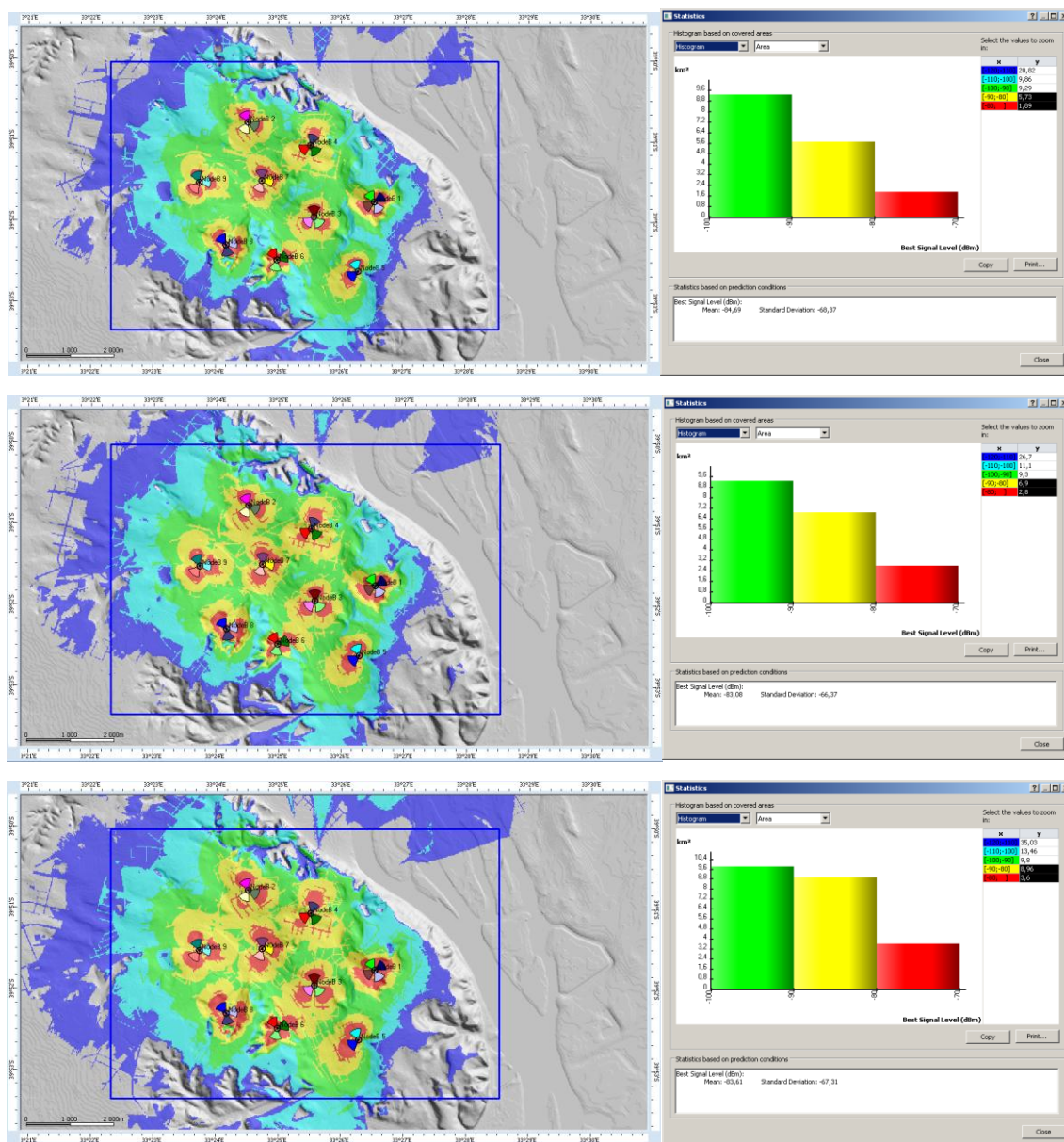


Рис. 7.13. Карти покриття та гістограми при використанні трьох підходів до побудови базових станцій

Обчислення, яким чином збільшилася площа покриття загалом не буде показовим, адже покриття від кожної БС перетинається, проте збільшення загальної площі відбулося і є очевидним як з карт, так і з гістограм. Більш показовим є те, наскільки збільшилася площа «червоного» і «жовтого» рівня сигналу по відношенню до «зеленого» рівня. Площа, на якій абонент може отримати найкращу швидкість передачі даних значно зростає, тоді як зони з

низьким рівнем прийнятого сигналу між базовими станціями зменшилися. Це говорить про покращення якості мережі.

В великих містах України оператори часто мають покриття, яке охоплює всю площу міста. Тому просте збільшення площі покриття не є для них аргументом для використання оптимізованого підходу до побудови БС. Але той факт, що швидкість передачі даних для абонентів покращиться є важливим і може спонукати операторів на зміну обладнання на мережі.

На картах, які розглядалися раніше можливо побачити лише таке покращення рівня сигналу, яке відбулося при переході від <-100 dBm до -100 dBm, від -100 dBm до -90 dBm, від -90 dBm до -80 dBm (тобто при переході з одного кольору на інший). Але зрозуміло, що рівень сигналу в зонах, що не змінили колір, також змінився. Щоб зрозуміти, як саме, використаємо вбудовану в Atoll функцію порівняння карт. Порівняємо карту покриття оптимізованої БС та карти покриття для БС з підключеннями feederline і feederless.

Порівняння карти покриття оптимізованої БС та карти покриття для БС з підключеннями feederline показана на рис. 7.14, а гістограма порівняння – на рис. 7.15.

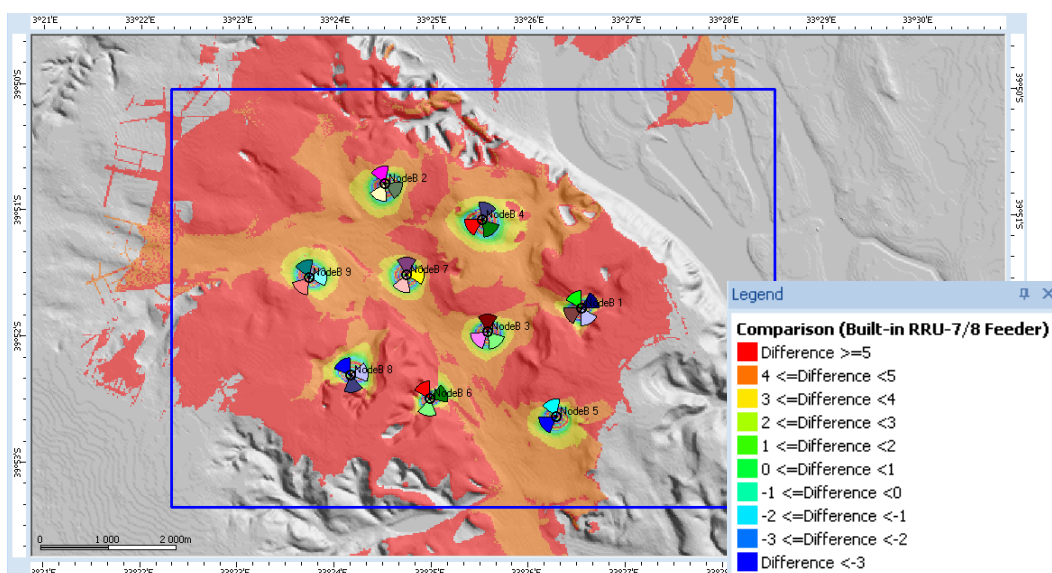


Рис. 7.14. Різниця в рівні прийнятого сигналу між оптимізованою мережею та мережею з використанням feederline підключення

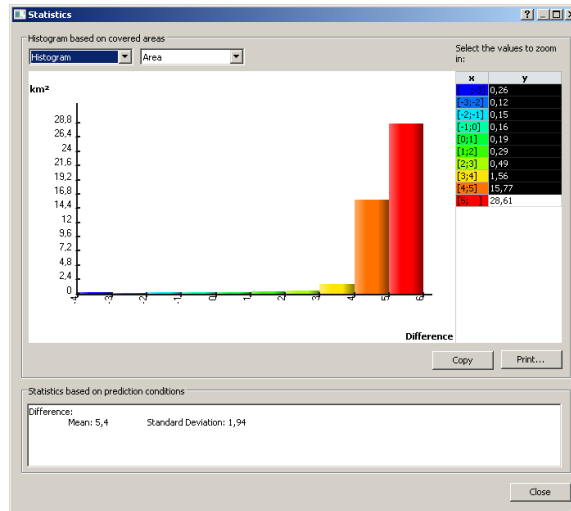


Рис. 7.15. Гістограми, що демонструють, на скільки покращився рівень сигналу в порівнянні з feederline підключенням

Порівняння карти покриття оптимізованої БС та карти покриття для БС з підключеннями feederline показана на рис. 7.16, а гістограма порівняння – на рис. 7.17.

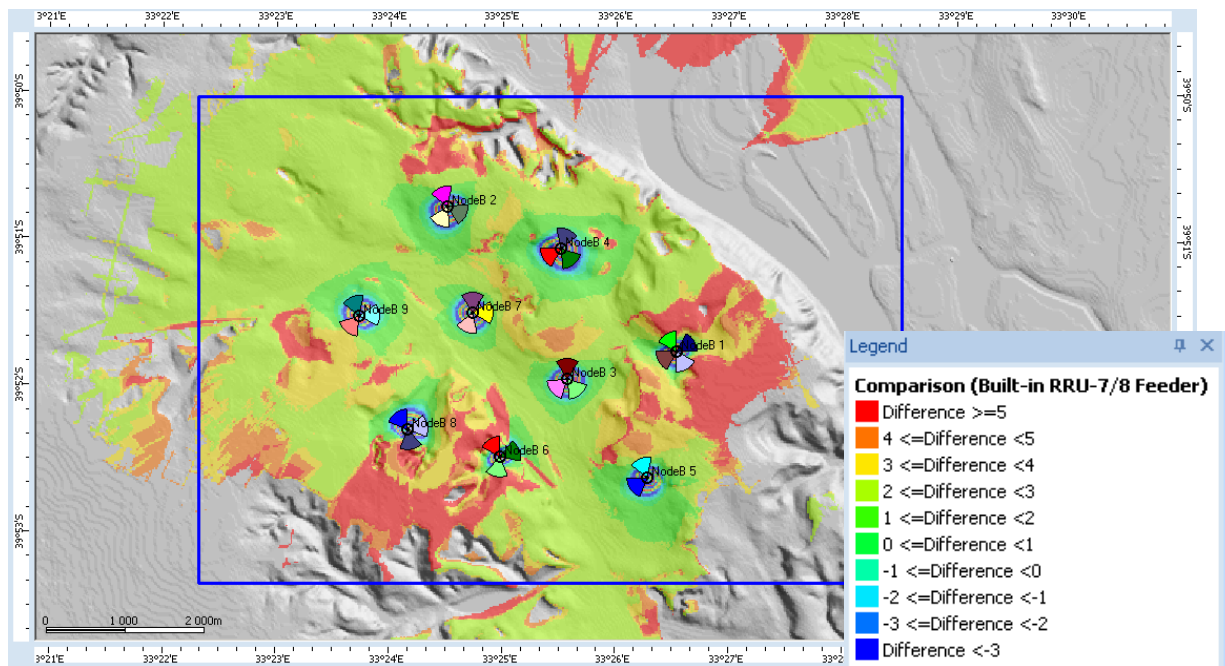


Рис. 7.16. Різниця в рівні прийнятого сигналу між оптимізованою мережею та мережею з використанням feederless підключення

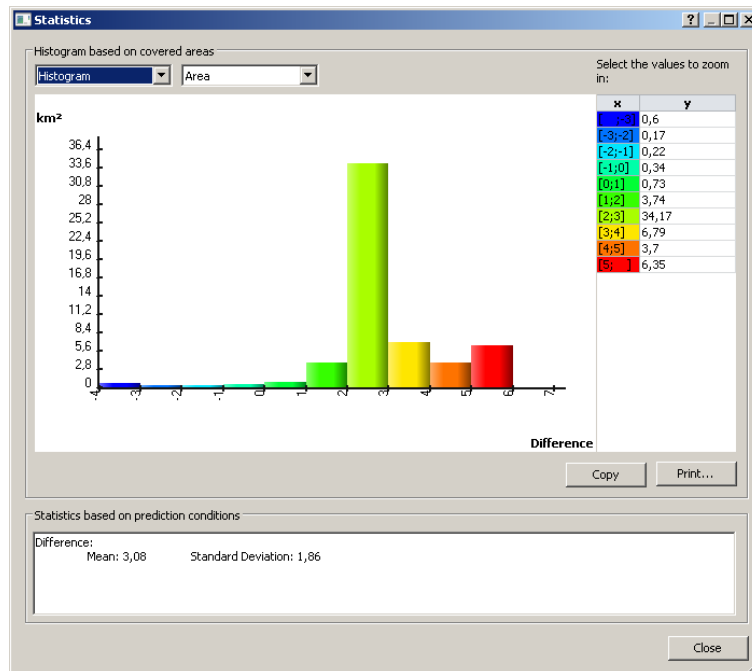


Рис. 7.17. Гістограми, що демонструють, на скільки покращився рівень сигналу в порівнянні з feederless підключенням

Порівняння оптимізованої БС та БС з підключеннями feederline дає можливість зрозуміти, що запропонований підхід набагато краще. Приблизно на 65% площі покриття БС зросло більше ніж на 5 dBm, приблизно 35% площі – від 4 до 5 dBm. При порівнянні із більш сучасною схемою підключення feederless також бачимо позитивний результат, але на приблизно 60% площі рівень сигналу покращився тільки на 3 dB, приблизно на 30% площі більш ніж на 3 dB. В деяких випадках 3 dB можуть допомогти абоненту перейти на більш швидкісну схему модуляції.

Також з гістограм видно, що в деяких (близько 1% площі) випадках рівень сигналу навпаки погіршився. Щоб зрозуміти причини цього, збільшимо одну з зон, де бачимо погіршення в покритті (рис. 7.18). Таке погіршення відбувається в ближній зоні до БС. Видно, що зони з погіршенням покриттям розташовані «кільцями» навколо БС.

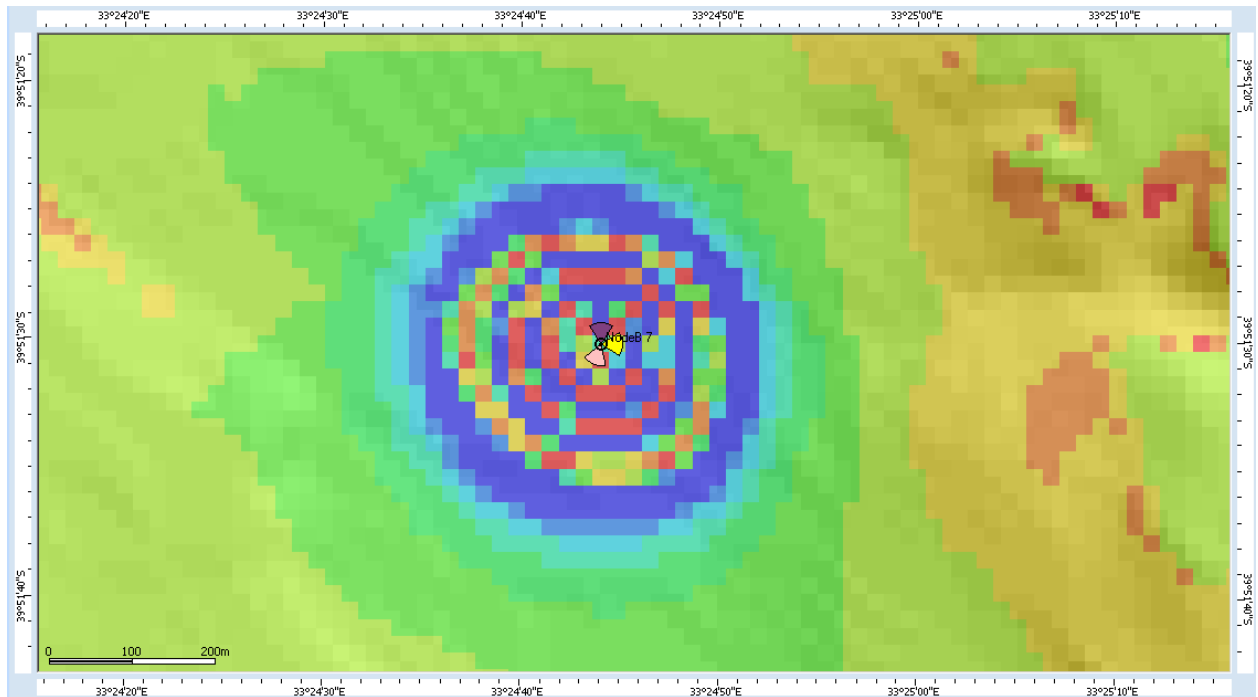


Рис. 7.18. Зона, де рівень сигналу погіршився (відтінки синього кольору)

Причина такого погіршення полягає в збільшенні висоти підвісу антени при оптимізованому підході в порівнянні з іншими підходами. Як було видно на правій частині рис. 7.16, діаграма направленості антен має бокові пелюстки. Саме ці пелюстки забезпечували високий рівень сигналу у ближній зоні. Якщо антену встановити вище, зони, рівень сигналу в яких забезпечували пелюстки «з'їдуть» трохи далі від антен. Збільшення висоти антени є дуже корисним для дальніх зон від антен, тоді як часткове погіршення сигналу в ближній зоні не є критичним, адже рівень сигналу там все одно залишиться високим.

7.2. Оцінка виграшу від розвантаження радіоінтерфейсу

Спочатку було визначено перелік сервісів, якими на даний момент можуть користуватися абоненти мобільного зв'язку. Серед яких виділяють [2]:

- голосові виклики (VoIP);
- WEB серфінг;
- відеоконференції (Vc);
- відеострімінг (IPTV);
- відеозв'язок (Skype);

- Google Maps (Maps);
- перегляд відеоконтенту (Youtube);
- ігри “Realtime”;
- соціальні мережі (FB).

Для безпосереднього моделювання трафіку було використані дані щодо необхідної пропускної здатності каналу для забезпечення якісного надання послуг мобільним абонентам: VoIP = 128 Кбіт/с, WEB = 512 Кбіт/с, Vc = 2 Мбіт/с, IPTV = 10 Мбіт/с, Skype = 1 Мбіт/с, Maps = 1 Мбіт/с, Youtube = 2 Мбіт/с, Ігри = 3 Мбіт/с, FB = 1 Мбіт/с.

Після цього було проведено опитування експертів щодо використання різних сервісів. Респондентам було запропоновано заповнити анкету (рис. 7.19).

Всього представлено 9 запитань, що стосуються конкретних послуг мобільного зв'язку:

- голосові виклики, VoIP;
- відеозв'язок (Skype, Viber тощо);
- відеоконференція;
- web-серфінг;
- Google Maps;
- перегляд відео (YouTube тощо);
- відеострімінг (IPTV тощо);
- ігри (“Realtime”);
- соціальні мережі (Facebook та ін.).

Якими послугами мобільного зв'язку Ви користуєтесь?

Чи користуєтесь Ви нижченаведеними послугами мобільного зв'язку (використовуючи технології безпроводного доступу 2G/3G) у дані проміжки часу? (Прохання обирати усі проміжки часу, протягом яких Ви найчастіше використовуєте послугу).

Голосові виклики, VoIP

- Ранок (06:00-12:00)
- День (12:00-18:00)
- Вечір (18:00-00:00)
- Ніч (00:00-06:00)
- Не користуюся послугою

Рис. 7.19. Анкета проведеного соціологічного опитування

У відповіді респондент мав обрати час доби, в який він користується даною послугою (в тому числі – цілодобово, або ж взагалі не користується).

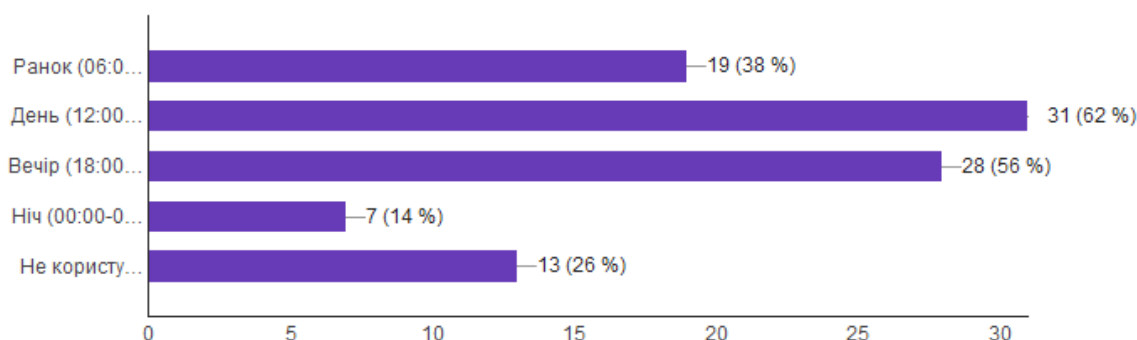
Запропоновані варіанти відповідей:

- ранок (06:00 – 12:00);
- день (12:00 – 18:00);
- вечір (18:00 – 00:00);
- ніч (00:00 – 06:00);
- не користуюся послугою.

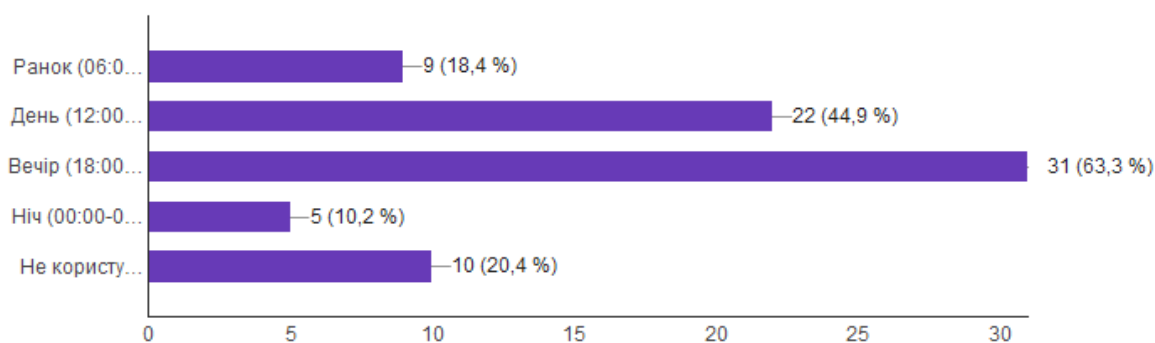
Таким чином, кожен міг обрати до чотирьох відповідей одночасно.

Для проектування базової моделі мережі стільникового зв'язку було проведено опитування 1000 абонентів, результати якого відображені на рис. 7.20.

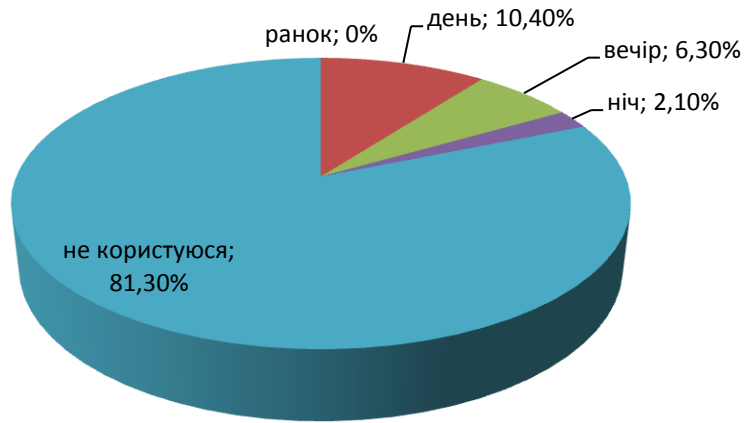
Голосові виклики, VoIP (50 ответов)



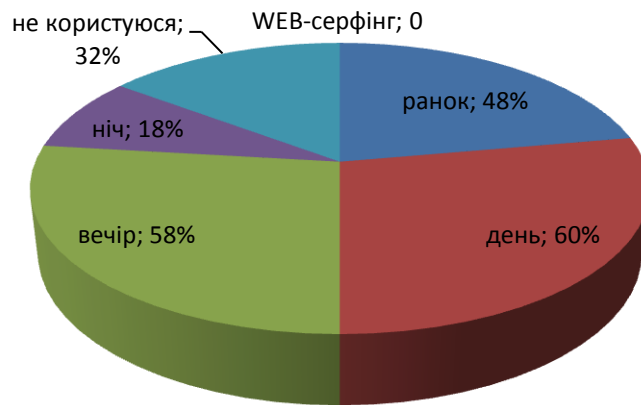
Відеозв'язок (Skype, Viber тощо) (49 ответов)



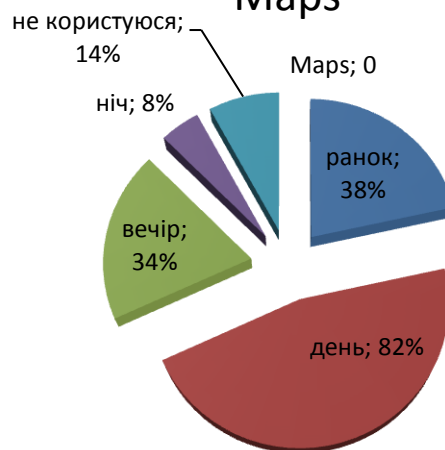
Відеоконференція



WEB-серфінг



Maps



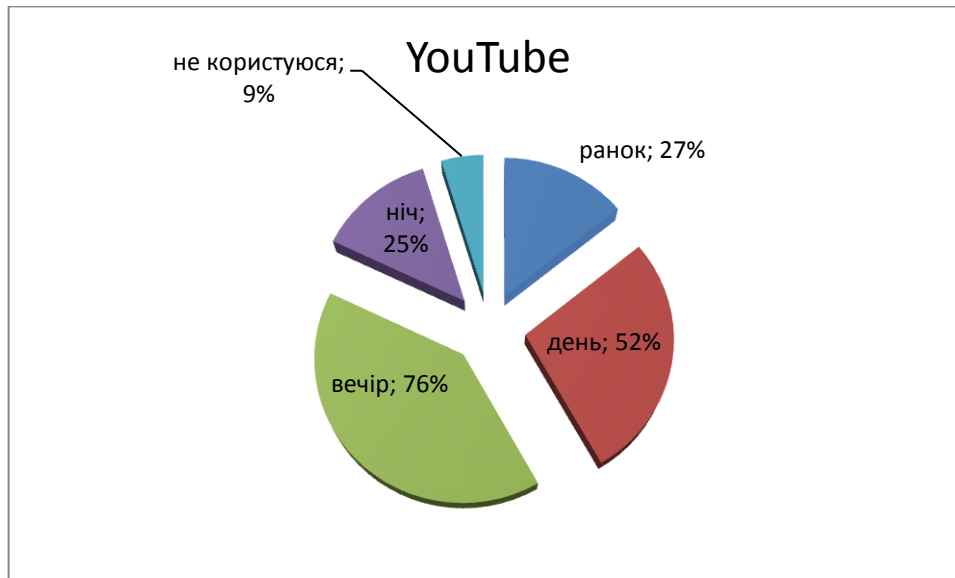


Рис. 7.20. Результати опитування

Слід відзначити, що відносна похибка результатів опитування склала 2%.

На наступному кроці було зроблено оцінку необхідної пропускної здатності БС. Розрахована сумарна пропускна здатність не має перевищувати пропускну здатність, що виділяється БС:

$$C_{sum} \leq C_{BC}.$$

Але при цьому рзраховані дані наступні:

$$C_{sum1} = 150,696 \text{ Мбіт/с},$$

$$C_{sum2} = 234,304 \text{ Мбіт/с},$$

$$C_{sum3} = 270,92 \text{ Мбіт/с},$$

$$C_{sum4} = 131,504 \text{ Мбіт/с},$$

$$C_{BC} = 42 \text{ Мбіт/с}.$$

Розраховані значення C_{sum} перевищують C_{BC} , тобто дана умова не виконується. Постає задача розвантаження трафіку.

$\Delta C = C_{sum} - C_{BC}$ – пропускна здатність трафіку, який необхідно передавати використовуючи технологію Wi-Fi.

$$\Delta C = 270,92 - 42 = 228,92 \text{ Мбіт/с}$$

Вищенаведене опитування проводилося для виявлення навантаження, що припадає на одну базову станцію стільникового зв'язку. Проводячи дослідження, було вирішено дізнатися окрім кількості абонентів та послуг,

якими вони користуються, ще й проміжки часу для виявлення піків завантаженості мережі мобільного оператора.

На основі отриманих даних було змодельовано процес обслуговування абонентів мобільного зв'язку однією базовою станцією.

На графіку (рис. 7.21) зображена динаміка користування абонентів мережі різними сервісами впродовж ранку (06:00 – 12:00).

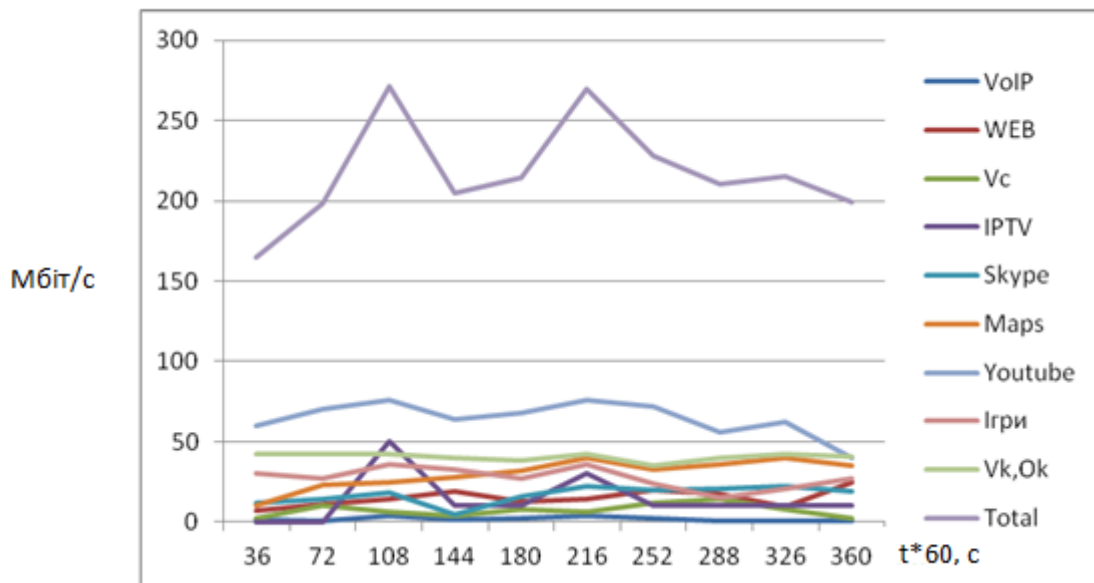


Рис.7.21. Залежність пропускної здатності від часу

Вісь ординат позначає кількість абонентів, що користуються певною послугою, а вісь абсцис позначає проміжки часу в секундах ($t \cdot 60$, с). Період спостереження (6 годин) ми розділили на 10 інтервалів по 36 хвилин ($36 \cdot 60 = 2160$ с). Сервіси позначені лініями різних кольорів. Total – сумарна кількість запитів у конкретні інтервали часу. На даному графіку пікове значення досягає 122, що дорівнює кількості абонентів, що обслуговуються одночасно однією БС. При цьому базова станція має виділити відповідну пропускну здатність 42 Мбіт/с.

Пікові значення пропускної здатності $C = 270,92$ Мбіт/с (19:48) і $C = 269,92$ Мбіт/с (21:36).

З огляду на те, що одна базова станція стандарту GSM може обслуговувати близько 100 абонентів одночасно (ми ж спостерігали більше 200 запитів вдень

та ввечері), виникає необхідність розвантаження мережі мобільного (стільникового) зв'язку. Базова станція мережі 3G розрахована на 200 абонентів, однак питання розвантаження трафіку залишається актуальним.

Для розвантаження трафіку ми обрали технологію Wi-Fi. Результати моделювання представлені на наступних графіках (рис. 7.22 – 7.25).

(а)

(б)

Рис.7.22. Залежність пропускної здатності від часу: а – для базової станції, б – для Wi-Fi точки доступу

На рисунку 7.23 (а) показані послуги, необхідна пропускна здатність яких $C_0 \leq 1$ Мбіт/с, а саме – VoIP; WEB; Skype; Maps; FB. При цьому використовується мережа мобільного оператора, а отже, трафік обслуговує базова станція. На рисунку 7.23 (б) показані послуги з необхідною пропускною

здатністю C_0 понад 1 Мбіт/с, такі як Vc; IPTV; Youtube; Ігри. В даному випадку застосовується технологія Wi-Fi. Порівнявши пікові значення пропускної здатності, що має виділити базова станція до та після процесу розвантаження трафіку, бачимо, що зі 150,696 Мбіт/с пропускна здатність каналу зменшилася до 61,696 Мбіт/с. Отже, зранку (06:00 – 12:00) ми можемо скоротити трафік в мережі на 59%.

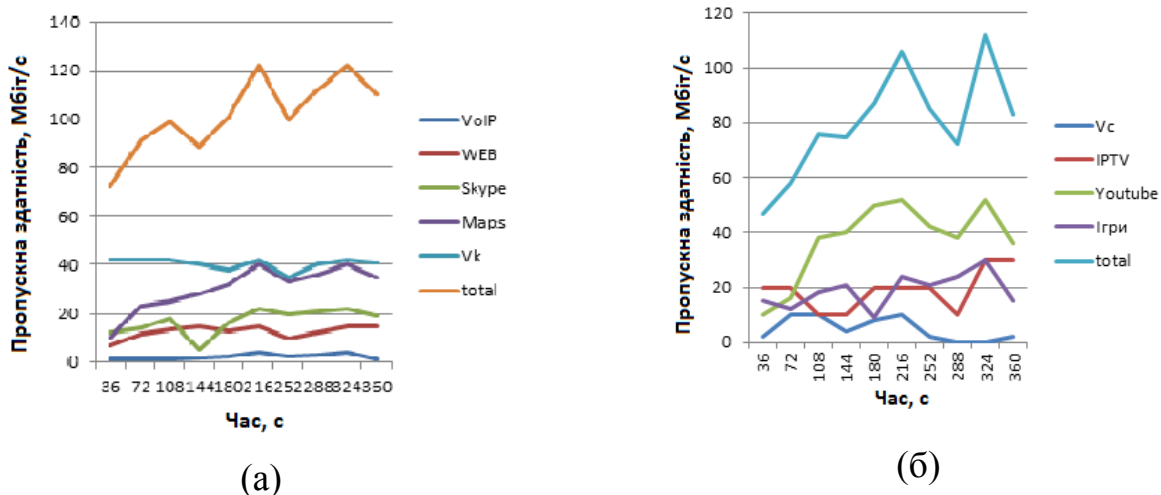


Рис. 7.23. Залежність пропускної здатності від часу: а – для базової станції, б – для Wi-Fi точки доступу

Вдень максимальне значення пропускної здатності каналу спадає від 234,304 Мбіт/с до 122,304 Мбіт/с. Таким чином, розвантаження мережі зменшує трафік майже на 48%.

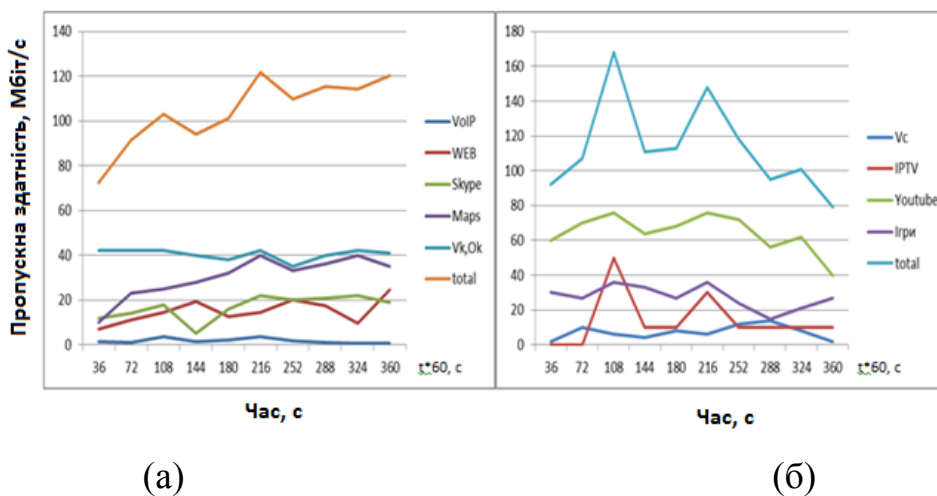


Рис. 7.24. Залежність пропускної здатності від часу: а – для базової станції, б – для Wi-Fi точки доступу

Ввечері за рахунок розвантаження вдається позбутися одного з пікових значень пропускної здатності, що має виділити базова станція. Якщо до процесу розвантаження значення пропускної здатності каналу досягало 270,92 Мбіт/с (19:48), то після нього $C = 102,92$ Мбіт/с. Все ж о 21:36 вечора пропускна здатність каналу $C = 121,92$ Мбіт/с. В результаті, ефективність розвантаження мережі складає 55%.

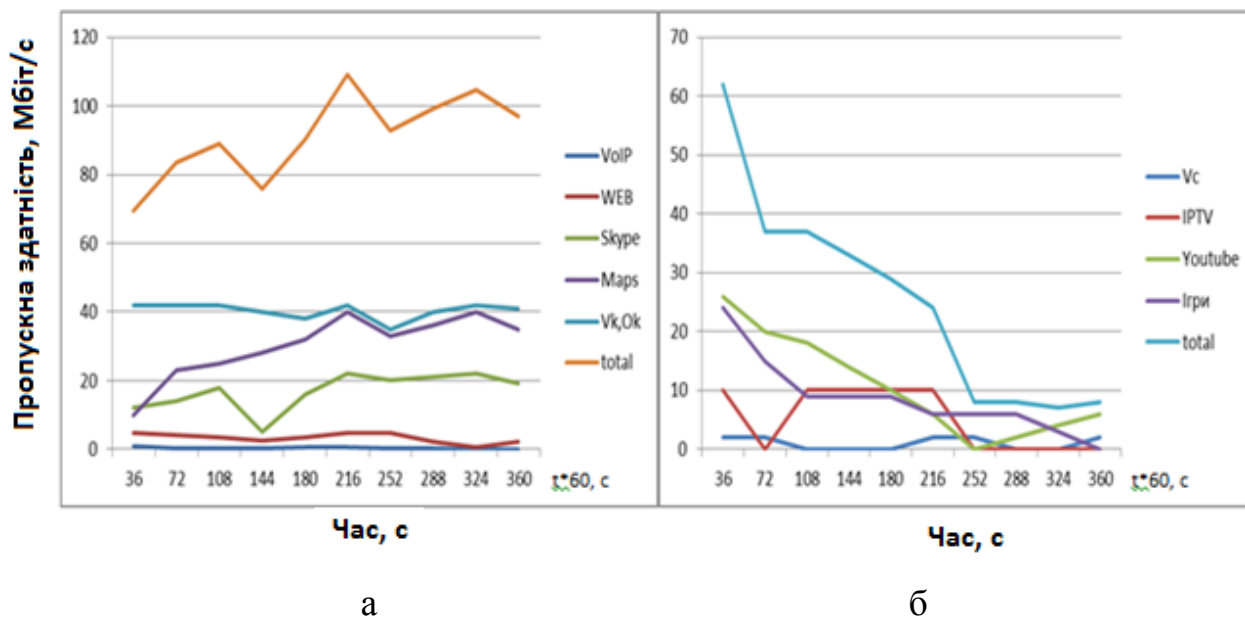


Рис. 7.25. Залежність пропускної здатності від часу: а – для базової станції, б – для Wi-Fi точки доступу

Вночі пропускна здатність, яку має виділити базова станція змінюється незначною мірою, зі значення 133,12 Мбіт/с до $C = 109,12$ Мбіт/с. Різниця всього лише 18%, проте загальний вигляд кривої після розвантаження має інакший характер, ніж на рисунку 7.23.

7.3. Моделювання балансування навантаження

Розглянемо навантаження мережі на прикладі найпростішої моделі масового обслуговування M/M/1, тобто одно каналної СМО з накопичувачем необмеженої ємності, в яку надходить неоднорідний потік заявок з експоненціальним розподіленням інтервалів часу між послідовними заявками

(найпростіший потік) і експоненціальною тривалістю обслуговування заявок в пристрої [2].

Для СМО з неоднорідним потоком заявок, в яку надходять H класів заявок з інтенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_H$ дані інтенсивності відображені на рис. 7.26.

$$\lambda_0(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_0)_0 \\ (\lambda_0)_1 \\ (\lambda_0)_2 \\ (\lambda_0)_3 \\ (\lambda_0)_4 \\ (\lambda_0)_5 \\ (\lambda_0)_6 \\ (\lambda_0)_7 \\ (\lambda_0)_8 \\ (\lambda_0)_9 \end{bmatrix} \quad \lambda_1(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_1)_0 \\ (\lambda_1)_1 \\ (\lambda_1)_2 \\ (\lambda_1)_3 \\ (\lambda_1)_4 \\ (\lambda_1)_5 \\ (\lambda_1)_6 \\ (\lambda_1)_7 \\ (\lambda_1)_8 \\ (\lambda_1)_9 \end{bmatrix} \quad \lambda_2(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_2)_0 \\ (\lambda_2)_1 \\ (\lambda_2)_2 \\ (\lambda_2)_3 \\ (\lambda_2)_4 \\ (\lambda_2)_5 \\ (\lambda_2)_6 \\ (\lambda_2)_7 \\ (\lambda_2)_8 \\ (\lambda_2)_9 \end{bmatrix} \quad \lambda_3(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_3)_0 \\ (\lambda_3)_1 \\ (\lambda_3)_2 \\ (\lambda_3)_3 \\ (\lambda_3)_4 \\ (\lambda_3)_5 \\ (\lambda_3)_6 \\ (\lambda_3)_7 \\ (\lambda_3)_8 \\ (\lambda_3)_9 \end{bmatrix}$$

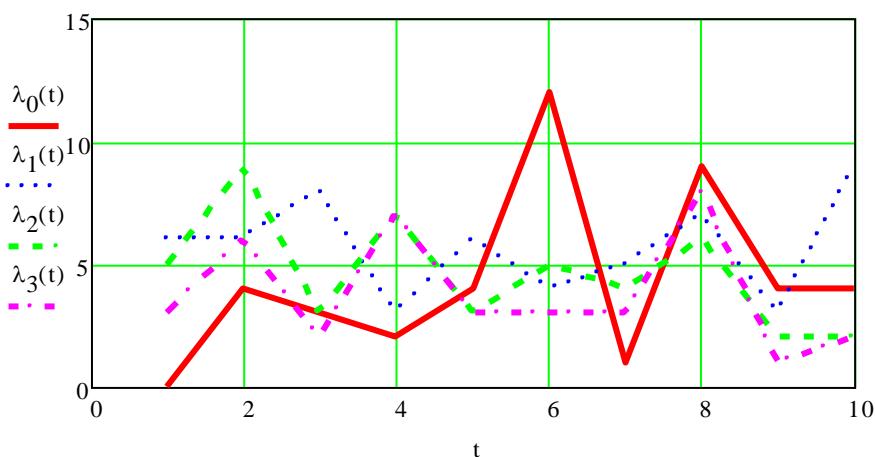


Рис. 7.26. Інтенсивність заявок в залежності від часу

Із середніми тривалостями обслуговування b_1, \dots, b_n :

$$b_i = rpois (M, 3).$$

Навантаження, що створюється заявками класу i :

$$y_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \lambda_i b_i.$$

Даний процес відображено на рис. 7.27.

$$y_0(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_0)_0 \cdot (b_0)_0 \\ (\lambda_0)_1 \cdot (b_0)_1 \\ (\lambda_0)_2 \cdot (b_0)_2 \\ (\lambda_0)_3 \cdot (b_0)_3 \\ (\lambda_0)_4 \cdot (b_0)_4 \\ (\lambda_0)_5 \cdot (b_0)_5 \\ (\lambda_0)_6 \cdot (b_0)_6 \\ (\lambda_0)_7 \cdot (b_0)_7 \\ (\lambda_0)_8 \cdot (b_0)_8 \\ (\lambda_0)_9 \cdot (b_0)_9 \end{bmatrix} \quad
 y_1(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_1)_0 \cdot (b_1)_0 \\ (\lambda_1)_1 \cdot (b_1)_1 \\ (\lambda_1)_2 \cdot (b_1)_2 \\ (\lambda_1)_3 \cdot (b_1)_3 \\ (\lambda_1)_4 \cdot (b_1)_4 \\ (\lambda_1)_5 \cdot (b_1)_5 \\ (\lambda_1)_6 \cdot (b_1)_6 \\ (\lambda_1)_7 \cdot (b_1)_7 \\ (\lambda_1)_8 \cdot (b_1)_8 \\ (\lambda_1)_9 \cdot (b_1)_9 \end{bmatrix} \quad
 y_2(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_2)_0 \cdot (b_2)_0 \\ (\lambda_2)_1 \cdot (b_2)_1 \\ (\lambda_2)_2 \cdot (b_2)_2 \\ (\lambda_2)_3 \cdot (b_2)_3 \\ (\lambda_2)_4 \cdot (b_2)_4 \\ (\lambda_2)_5 \cdot (b_2)_5 \\ (\lambda_2)_6 \cdot (b_2)_6 \\ (\lambda_2)_7 \cdot (b_2)_7 \\ (\lambda_2)_8 \cdot (b_2)_8 \\ (\lambda_2)_9 \cdot (b_2)_9 \end{bmatrix} \quad
 y_3(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_3)_0 \cdot (b_3)_0 \\ (\lambda_3)_1 \cdot (b_3)_1 \\ (\lambda_3)_2 \cdot (b_3)_2 \\ (\lambda_3)_3 \cdot (b_3)_3 \\ (\lambda_3)_4 \cdot (b_3)_4 \\ (\lambda_3)_5 \cdot (b_3)_5 \\ (\lambda_3)_6 \cdot (b_3)_6 \\ (\lambda_3)_7 \cdot (b_3)_7 \\ (\lambda_3)_8 \cdot (b_3)_8 \\ (\lambda_3)_9 \cdot (b_3)_9 \end{bmatrix}$$

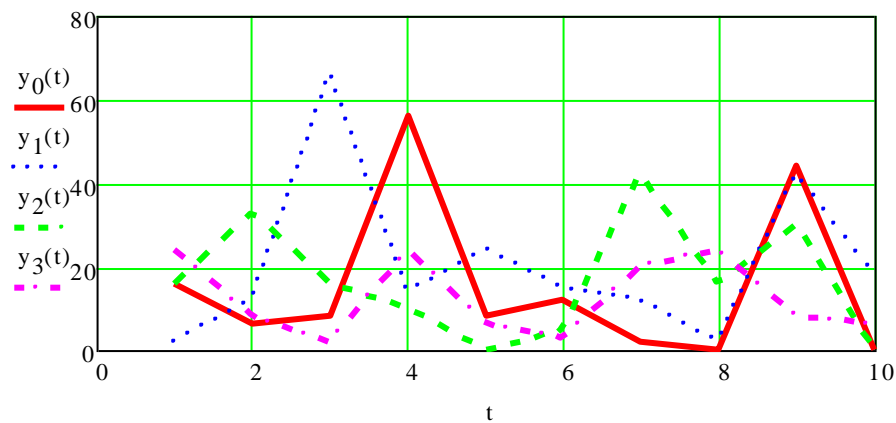


Рис. 7.27. Тривалість обслуговування заявок в різні проміжки часу

Ймовірність обслуговування заявки $\pi_{0_i} = (1 - \pi_{n_i})$:

$$\pi_{00} = 1 - \pi_{i_0},$$

$$\pi_{01} = 1 - \pi_{i_1},$$

$$\pi_{02} = 1 - \pi_{i_2},$$

$$\pi_{03} = 1 - \pi_{i_3}.$$

Інтенсивність потоку обслужених заявок (продуктивність по i -му класу заявок)

(рис. 7.28):

$$\lambda_{0_i} = \pi_{0_i} \lambda_i = (1 - \pi_{n_i}) \lambda_i.$$

$$\lambda_{n0}(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_0)_0 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_1 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_2 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_3 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_4 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_5 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_6 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_7 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_8 \cdot \pi_{i_0} \\ (\lambda_0)_9 \cdot \pi_{i_0} \end{bmatrix} \quad
 \lambda_{n1}(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_1)_0 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_1 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_2 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_3 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_4 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_5 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_6 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_7 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_8 \cdot \pi_{i_1} \\ (\lambda_1)_9 \cdot \pi_{i_1} \end{bmatrix} \quad
 \lambda_{n2}(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_2)_0 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_1 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_2 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_3 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_4 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_5 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_6 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_7 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_8 \cdot \pi_{i_2} \\ (\lambda_2)_9 \cdot \pi_{i_2} \end{bmatrix} \quad
 \lambda_{n3}(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_3)_0 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_1 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_2 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_3 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_4 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_5 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_6 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_7 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_8 \cdot \pi_{i_3} \\ (\lambda_3)_9 \cdot \pi_{i_3} \end{bmatrix}$$

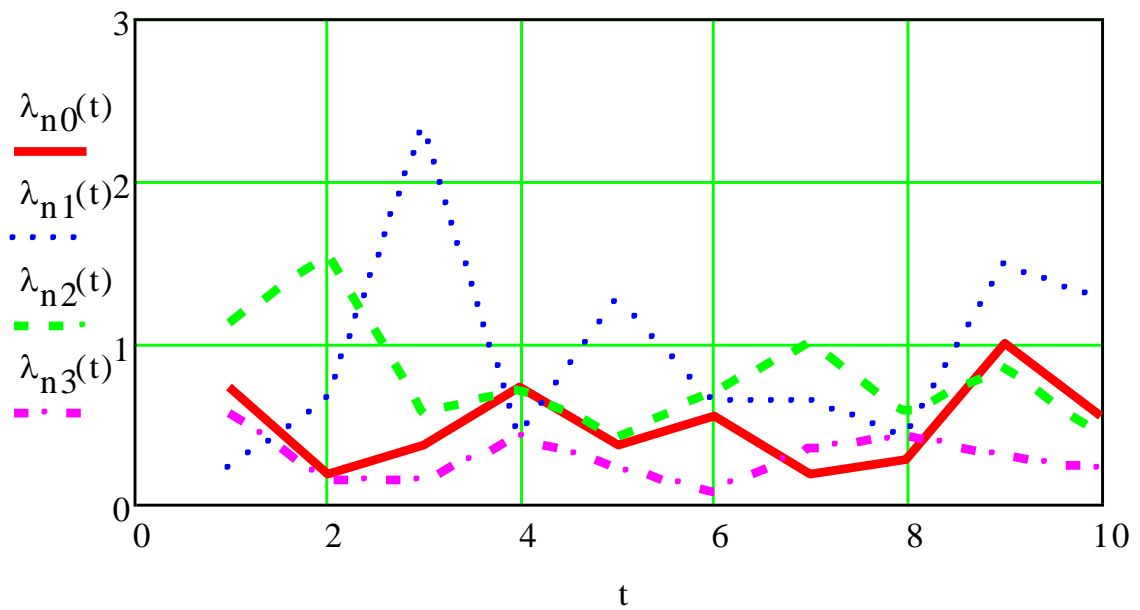


Рис. 7.28. Інтенсивність потоку обслуговуваних заявок

Інтенсивність потоку втрачених заявок (рис. 7.29):

$$\lambda_{n_i} = \pi_{n_i} \lambda_i.$$

$$p_0(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_0)_0 \cdot (b_0)_0 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_1 \cdot (b_0)_1 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_2 \cdot (b_0)_2 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_3 \cdot (b_0)_3 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_4 \cdot (b_0)_4 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_5 \cdot (b_0)_5 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_6 \cdot (b_0)_6 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_7 \cdot (b_0)_7 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_8 \cdot (b_0)_8 \cdot \pi_{00} \\ (\lambda_0)_9 \cdot (b_0)_9 \cdot \pi_{00} \end{bmatrix} \quad p_1(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_0)_0 \cdot (b_0)_0 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_1 \cdot (b_0)_1 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_2 \cdot (b_0)_2 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_3 \cdot (b_0)_3 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_4 \cdot (b_0)_4 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_5 \cdot (b_0)_5 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_6 \cdot (b_0)_6 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_7 \cdot (b_0)_7 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_8 \cdot (b_0)_8 \cdot \pi_{01} \\ (\lambda_0)_9 \cdot (b_0)_9 \cdot \pi_{01} \end{bmatrix} \quad p_2(t) := \begin{bmatrix} (\lambda_0)_0 \cdot (b_0)_0 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_1 \cdot (b_0)_1 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_2 \cdot (b_0)_2 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_3 \cdot (b_0)_3 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_4 \cdot (b_0)_4 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_5 \cdot (b_0)_5 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_6 \cdot (b_0)_6 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_7 \cdot (b_0)_7 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_8 \cdot (b_0)_8 \cdot \pi_{02} \\ (\lambda_0)_9 \cdot (b_0)_9 \cdot \pi_{02} \end{bmatrix}$$

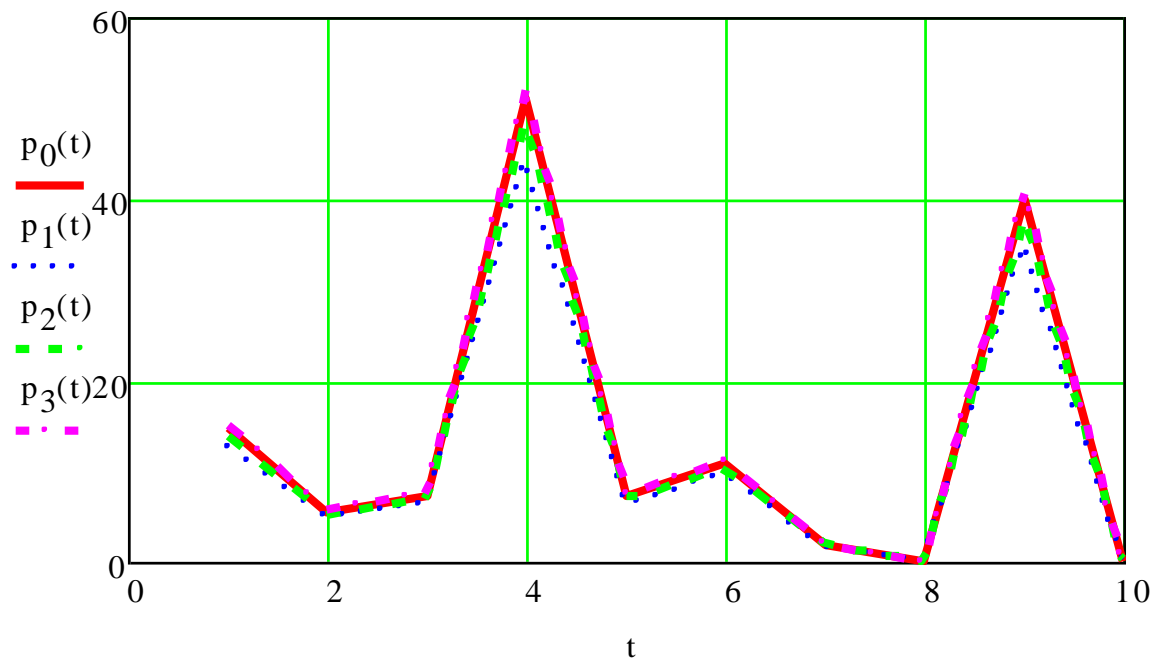


Рис. 7.29. Інтенсивність потоку втрачених заявок

Завантаженість системи, створена заявками класу i (рис. 7.30):

$$\rho_i = \min \left(\frac{(1 - \pi_{n_i}) y_i}{k}; 1 \right).$$

$$\rho_0(t) := \begin{bmatrix} \min[\lambda_0)_0 \cdot (b_0)_0 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_1 \cdot (b_0)_1 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_2 \cdot (b_0)_2 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_3 \cdot (b_0)_3 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_4 \cdot (b_0)_4 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_5 \cdot (b_0)_5 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_6 \cdot (b_0)_6 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_7 \cdot (b_0)_7 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_8 \cdot (b_0)_8 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_0)_9 \cdot (b_0)_9 \cdot \pi_{00}, \bar{1}] \end{bmatrix}$$

$$\rho_1(t) := \begin{bmatrix} \min[\lambda_1)_0 \cdot (b_1)_0 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_1 \cdot (b_1)_1 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_2 \cdot (b_1)_2 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_3 \cdot (b_1)_3 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_4 \cdot (b_1)_4 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_5 \cdot (b_1)_5 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_6 \cdot (b_1)_6 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_7 \cdot (b_1)_7 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_8 \cdot (b_1)_8 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_1)_9 \cdot (b_1)_9 \cdot \pi_{01}, \bar{1}] \end{bmatrix}$$

$$\rho_2(t) := \begin{bmatrix} \min[\lambda_2)_0 \cdot (b_2)_0 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_1 \cdot (b_2)_1 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_2 \cdot (b_2)_2 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_3 \cdot (b_2)_3 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_4 \cdot (b_2)_4 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_5 \cdot (b_2)_5 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_6 \cdot (b_2)_6 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_7 \cdot (b_2)_7 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_8 \cdot (b_2)_8 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_2)_9 \cdot (b_2)_9 \cdot \pi_{02}, \bar{1}] \end{bmatrix}$$

$$\rho_3(t) := \begin{bmatrix} \min[\lambda_3)_0 \cdot (b_3)_0 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_1 \cdot (b_3)_1 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_2 \cdot (b_3)_2 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_3 \cdot (b_3)_3 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_4 \cdot (b_3)_4 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_5 \cdot (b_3)_5 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_6 \cdot (b_3)_6 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_7 \cdot (b_3)_7 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_8 \cdot (b_3)_8 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \\ \min[\lambda_3)_9 \cdot (b_3)_9 \cdot \pi_{03}, \bar{1}] \end{bmatrix}$$

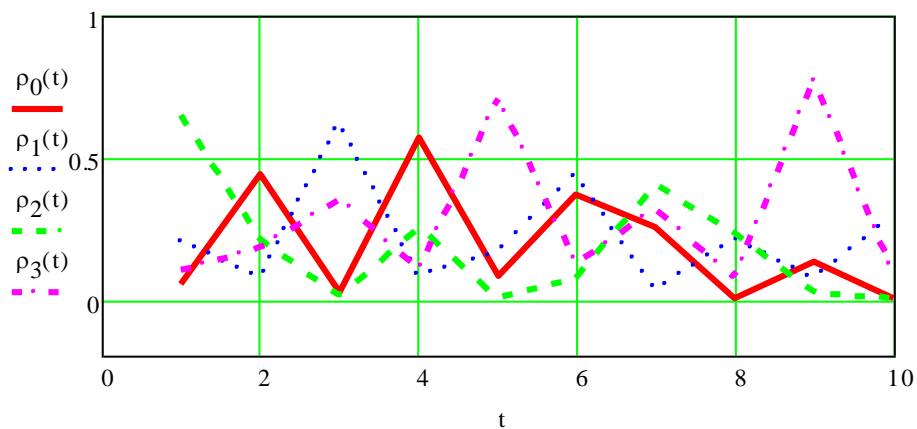


Рис. 7.30. Завантаженість системи

Завантаженість системи, створена заявками класу i $\rho_i = \min\left(\frac{(1-\pi_{n_i})y_i}{k}; 1\right)$

після оптимізації перерозподілу потоків трафіку (балансування навантаження) (рис. 7.31).

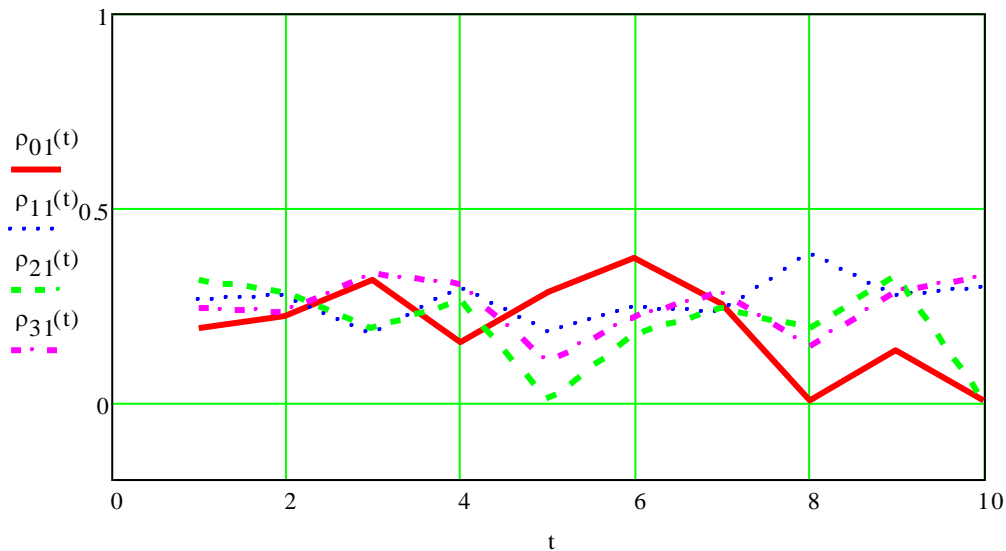


Рис. 7.31. Завантаженість системи після оптимізації

Як видно з рис. 7.31 застосування розробленого в 4-му розділі дисертаційної роботи удосконаленого методу маршрутизації із балансуванням навантаження дозволяє досягнути більш збалансованого розподілу трафіку по всій мережі і відповідно більш високих показників ефективності утилізації наявних ресурсів.

7.4. Моделювання роботи SDN мережі

В цьому підрозділі проведено моделювання для вивчення різних підходів побудови архітектури рівня управління SDN, налаштовано HTTP сервер на одному з хостів та виконане підключення з іншого хоста до даного серверу. Було також досліджено повідомлення, якими обмінюються хости в мережі.

7.4.1. Централізована структура рівня управління

В програмному середовищі MiniEdit [3] була розроблена імітаційна модель мережі SDN [4]. Імітаційна модель представляє собою контролер (c0), три комутатори (s1, s2, s3), сім хостів (h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7). Перші чотири хости приєднані до першого комутатора (s1), до другого комутатора (s2) підключений хост h5, а до третього комутатора (s3) – хости h6, h7. Контролер з'єднаний з усіма комутаторами, а комутатори s2, s3 приєднані до s1. Топологія описаної мережі представлена на рис. 7.32. Для підтвердження працездатності мережі була проведена перевірка з'єднання між вузлами мережі. Після запуску мережі було перевірено її працездатність за допомогою команди «pingall».

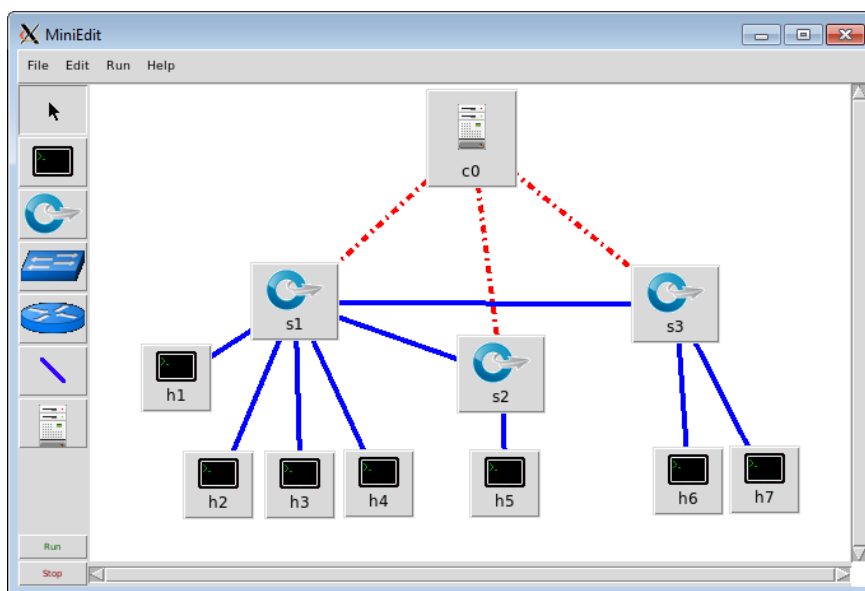
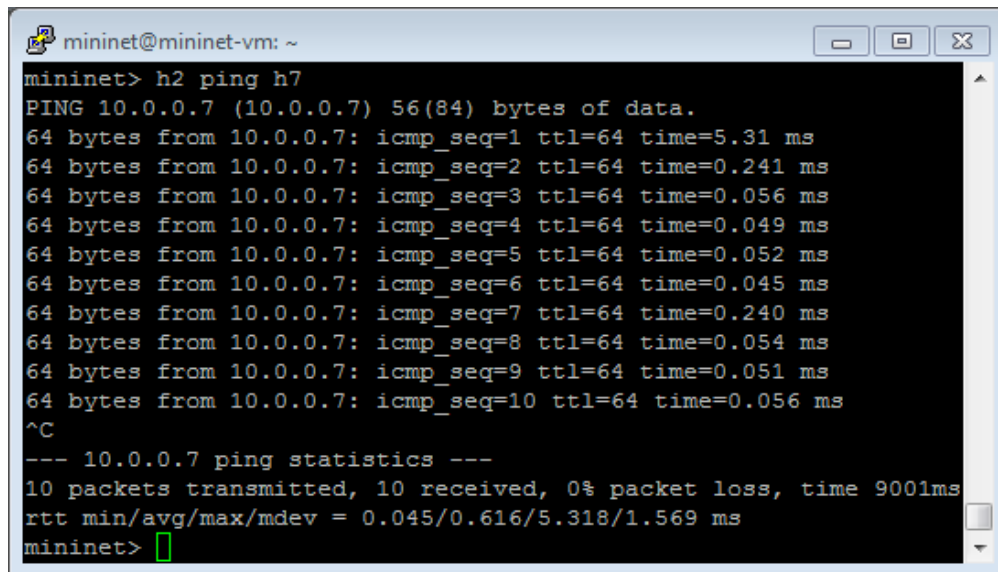


Рис. 7.32. Модель централізованої архітектури рівня управління

Мережа працює нормально, тому що всі хости доступні, і пакети не втрачаються під час передачі.

Було досліджено швидкість передачі даних в даній мережі за допомогою команди «ping» (рис .7.33). Перший пакет передається найдовше, тому що спочатку комутатор немає запису в таблиці потоків. Коли приходить перший пакет, комутатор направляє його контролеру. Контролер приймає рішення і дає вказівку усім комутаторам додати інформацію про цей шлях в таблицю потоків. Після цього комутатор не буде запитувати контролер, як оброблювати такі пакети, а буде пересилати відповідно до своєї таблиці потоків. Якщо прийде

пакет, про який комутатор не володіє інформацією, то комутатор буде знову посилати запит до контролера.



```
mininet@mininet-vm: ~
mininet> h2 ping h7
PING 10.0.0.7 (10.0.0.7) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=1 ttl=64 time=5.31 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.241 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.056 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.049 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.052 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=6 ttl=64 time=0.045 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=7 ttl=64 time=0.240 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=8 ttl=64 time=0.054 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=9 ttl=64 time=0.051 ms
64 bytes from 10.0.0.7: icmp_seq=10 ttl=64 time=0.056 ms
^C
--- 10.0.0.7 ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 9001ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.045/0.616/5.318/1.569 ms
mininet>
```

Рис. 7.33. Ping хоста h7 з хоста h2

Перевіримо, як зміниться швидкість передачі зі збільшенням кількості хостів. Залишимо мережу як на рис. 7.32, але збільшимо кількість хостів до 34.

Зі збільшенням кількості вузлів, масштабованість мережі погіршується. Це видно по часу обробки запиту. Він очевидно більший у мережі з 34 хостами, ніж з семи хостами. Але з невеликою кількістю хостів це не так помітно, тому що масштабованість погіршується в незначних межах. При великій кількості хостів мережа може взагалі перестати функціонувати.

Проведемо дослідження по пропускній здатності централізованої структури рівня управління. Для цього створимо простий HTTP сервер на базі хоста h1.

З хоста h2 спробуємо отримати до нього доступ та завантажити дані, які там знаходяться за допомогою команди h2 wget -O - h1.

Після відправлення запиту з хоста h2 сервер відповідає на нього. Отримавши відповідь «АСК» хост h2 отримує доступ до необхідних даних на сервері. Швидкість передачі даних становить 66,9 МБ/с.

7.4.2. Глобальна децентралізована структура рівня управління

В програмному середовищі MiniEdit була розроблена відповідна імітаційна модель мережі SDN. Імітаційна модель представляє собою два контролери (c0, c1), три комутатори (s1, s2, s3), сім хостів (h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7). Перші три хости приєднані до першого комутатора (s1), до другого комутатора (s2) підключені хости h4, h5, а до третього комутатора (s3) – хости h6, h7. Контролери з'єднані з усіма комутаторами службовими каналами, а комутатори s1, s2, s3 – каналами передачі даних між собою. Топологія описаної мережі представлена на рис. 7.34. Для підтвердження працездатності мережі була проведена перевірка з'єднання між вузлами мережі.

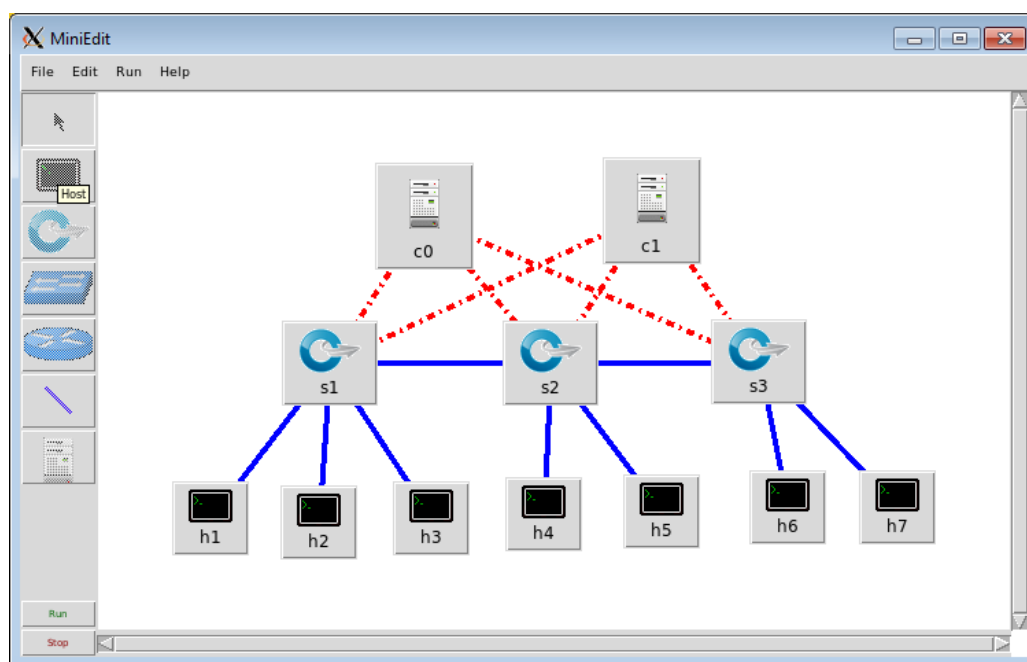


Рис. 7.34. Модель глобальної децентралізованої архітектури рівня управління

Було досліджено швидкість передачі даних в даній мережі за допомогою команди «ping».

Проведено дослідження по пропускній здатності глобальної децентралізованої структури рівня управління. Для цього було створено простий HTTP сервер на базі хоста h5.

Після відправлення запиту з хоста h2 сервер відповідає на нього. Отримавши відповідь «АСК» хост h2 отримує доступ до необхідних даних на сервері. Швидкість передачі даних становить 137 Мб/с, що вище ніж у

централізованій архітектурі. Це показує, що глобальний децентралізований підхід до побудови архітектури мережі більш вигідний у порівнянні з централізованим.

7.4.3. Локальна децентралізована структура рівня управління

В програмному середовищі MiniEdit була розроблена імітаційна модель мережі SDN. Імітаційна модель представляє собою два контролери (c0, c1), три комутатори (s1, s2, s3), сім хостів (h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7). Перші три хости приєднані до першого комутатора (s1), до другого комутатора (s2) підключені хости h4, h5, а до третього комутатора (s3) – хости h6, h7. Контролер c0 з'єднаний з комутатором s1, а контролер c1 – з s2, s3 службовими каналами. Комутатори s1, s2, s3 з'єднані каналами передачі даних між собою. Топологія описаної мережі представлена на рис. 7.35. Для підтвердження працездатності мережі була проведена перевірка з'єднання між вузлами мережі.

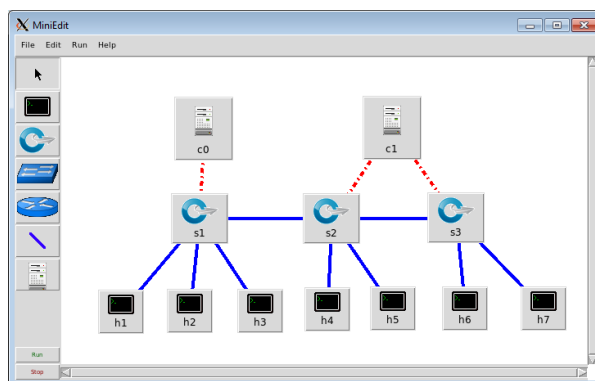


Рис. 7.35. Модель локальної децентралізованої архітектури рівня управління

Було досліджено швидкість передачі даних в локальній децентралізованій мережі за допомогою команди «ping».

Також подібно 7.5.1 та 7.5.2 було визначено швидкість передачі даних, яка становить 142 Мб/с, що вище ніж у централізованій та глобальній децентралізованій архітектурі. Це показує, що локальний децентралізований підхід до побудови архітектури мережі ще більш вигідний у порівнянні з централізованим та глобальним децентралізованим.

7.5. Моделювання кібератак та їх виявлення в мережі

Для проведення досліджень виникнення та виявлення атак типу DoS в роботі було спроектовано наступну мережу (див. рис. 7.36) [5].

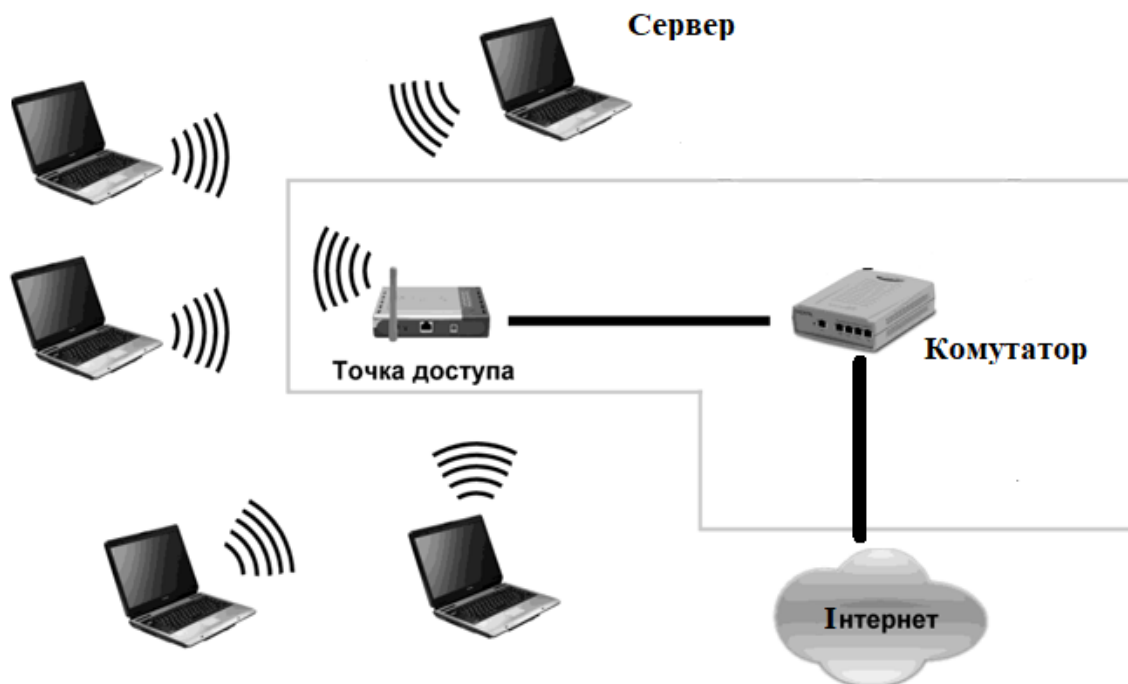


Рис. 7.36. Архітектура досліджуваної мережі

Для проведення експерименту локальна мережа була побудована з використанням таких елементів.

1. Чотири ноутбука.
2. Ноутбук, що був назначений як сервер.
3. Маршрутизатор.
4. Комутатор.

Етапи проведення експерименту наступні.

1. Запускаємо програму Wireshark на серверному ноутбуку.

Після початку захоплення трафіку, Wireshark в режимі реального часу захоплює мережеві пакети і виводить їх у вікні призначеного для користувача інтерфейсу. Можна зробити висновок, що в локальній мережі безперервно передається інформація. Розглянемо графік передачі пакетів в локальній мережі за 5 хвилин (див. рис. 7.37).

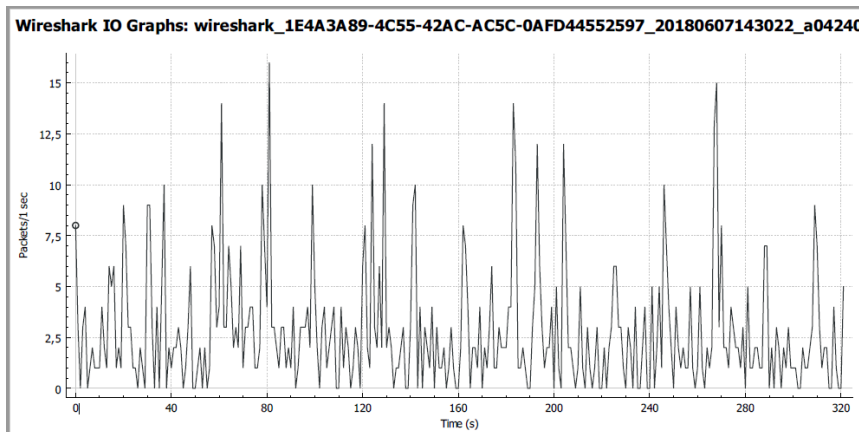


Рис. 7.37. Аналіз трафіку мережі за 5 хвилин

З цього графіку можна зробити висновок, що в звичному режимі роботи мережі в середньому значення не перевищують 8 пакетів в секунду. Пікові точки є аномаліями.

Відомо, що для оцінки часу очікування в пуассоновському процесі використовується експоненційний розподіл. Якщо ми очікуємо подію яка відбувається у середньому кожні $1/\lambda$ одиниць часу (з інтенсивністю λ), то розподіл часу очікування дорівнює

$$p(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}.$$

В програмному середовищі Mathcad було проаналізовано вхідні значення та побудовано гістограму розподілу інтенсивності трафіку без атаки, яке підпорядковується експоненціальному закону розподілу (рис. 7.38).

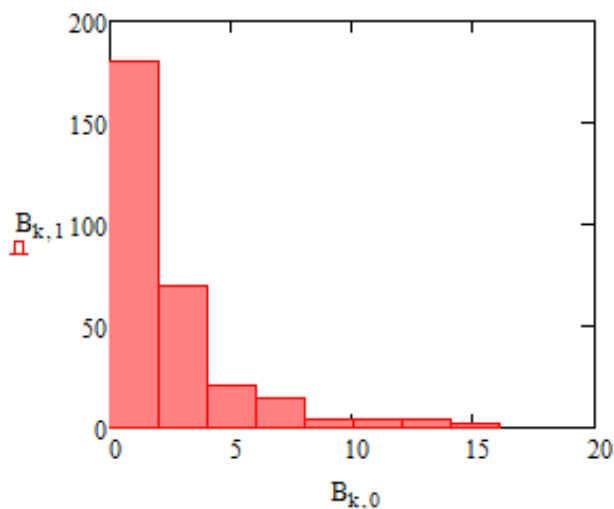


Рис. 7.38. Гістограма моделі трафіку без атаки

Таким чином, щільність розподілу імовірностей у разі відсутності атаки дорівнює

$$f_0(x) = \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot x},$$

де час очікування:

$$\lambda = \frac{1}{T},$$

$$T = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i.$$

Для виявлення атаки доцільно використовувати метод CUSUM (CUmulative SUM - «кумулятивна сума»). Цей метод використовується для перевірки стабільності параметрів моделі на всій виборці.

2. На цьому етапі нам потрібно імітувати можливі DDoS атаки на сервер.

Для цього відбувається пінгування серверу з усіх чотирьох ноутбуків одночасно, тим самим імітується атака ping flood.

DDoS-атака здійснюється таким чином: на сервер з IP адресою 192.168.0.111 передаємо пакет 32 байта і відповідь отримуємо у середньому через 20 мс, Time to live (TTL) пакета становить 128. В загальному випадку було відправлено 118 пакетів з кожного атакуючого ноутбука (рис. 7.39).

```
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=21мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=22мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=17мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=17мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=24мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=17мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=17мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=24мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=17мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=22мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=25мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=19мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=22мс TTL=128
Ответ от 192.168.0.111: число байт=32 время=20мс TTL=128

Статистика Ping для 192.168.0.111:
Пакетов: отправлено = 118, получено = 118, потеряно = 0
(0% потерь)
Приблизительное время приема-передачи в мс:
Минимальное = 17мкс, Максимальное = 40 мкс, Среднее = 20 мкс
Сингловый C
C
```

Рис. 7.39. Здійснена DDoS атака

На графіку можна прослідкувати різке збільшення кількості пакетів у секунду, що означає початок атаки і зменшення кількості пакетів, що повідомляє про кінець атаки (рис. 7.40).

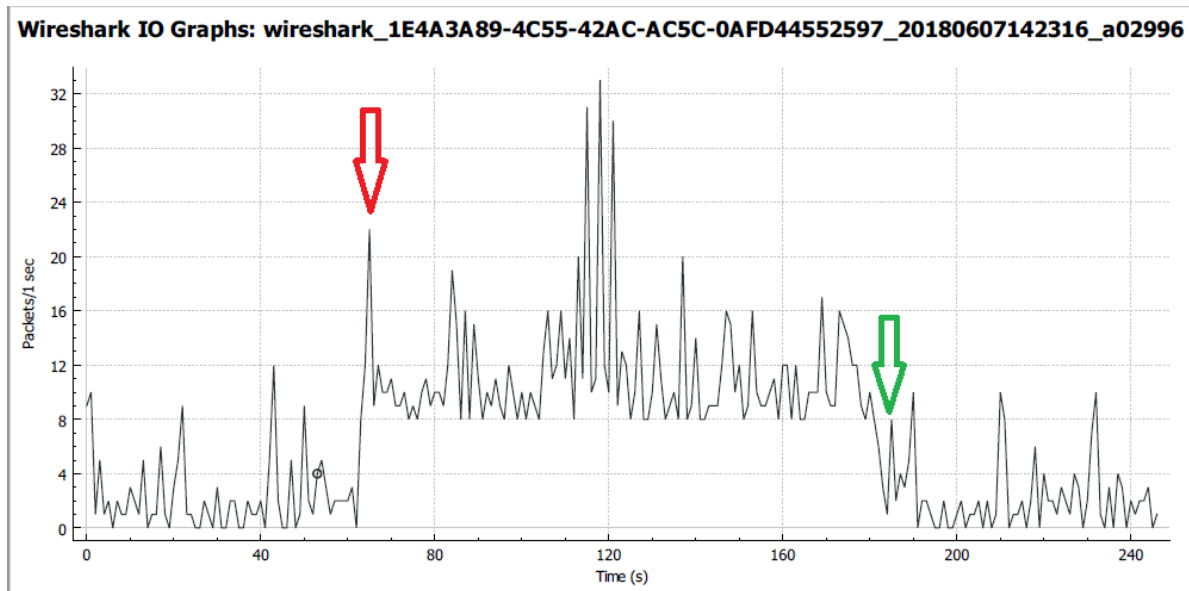


Рис. 7.40. Початок і кінець атаки

Таким чином функція правдоподібності дорівнює

$$f_1(x) = \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot x}.$$

3. Виходячи з отриманих результатів, розрахуємо порогове значення h .

Для розрахунку цього значення знайдмо відношення правдоподібності, що дорівнює

$$\Lambda = \prod \frac{f_1(x)}{f_0(x)} = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot x}}{\lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot x}}.$$

Для спрощення відношення прологарифмуємо його:

$$\ln \Lambda = (n - i - 1) \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right) + \lambda_0 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right) \cdot \sum_{j=i}^n x_j.$$

Тобто логарифмічне відношення правдоподібності є вирішальною статистикою.

Порогове значення h дорівнює функції помилки першого роду $h=g(\alpha)$. Існує два способи вирішення цієї задачі: аналітичний та моделювання. Виходячи з того, що аналітичний метод потребує використання складних математичних моделей та тривалого часу, то в роботі був використаний метод моделювання.

Візьмемо, що $\alpha = 0,0001$. Таким чином, обчисливши 1000 разів функцію правдоподібності без атаки та знайшовши вирішальну статистику було

знайдено максимуми функції. Максимум цих максимумів буде пороговим значенням. В цьому випадку $h=20$.

Перевищення цього значення буде говорити про атаку на мережу (рис. 7.41).

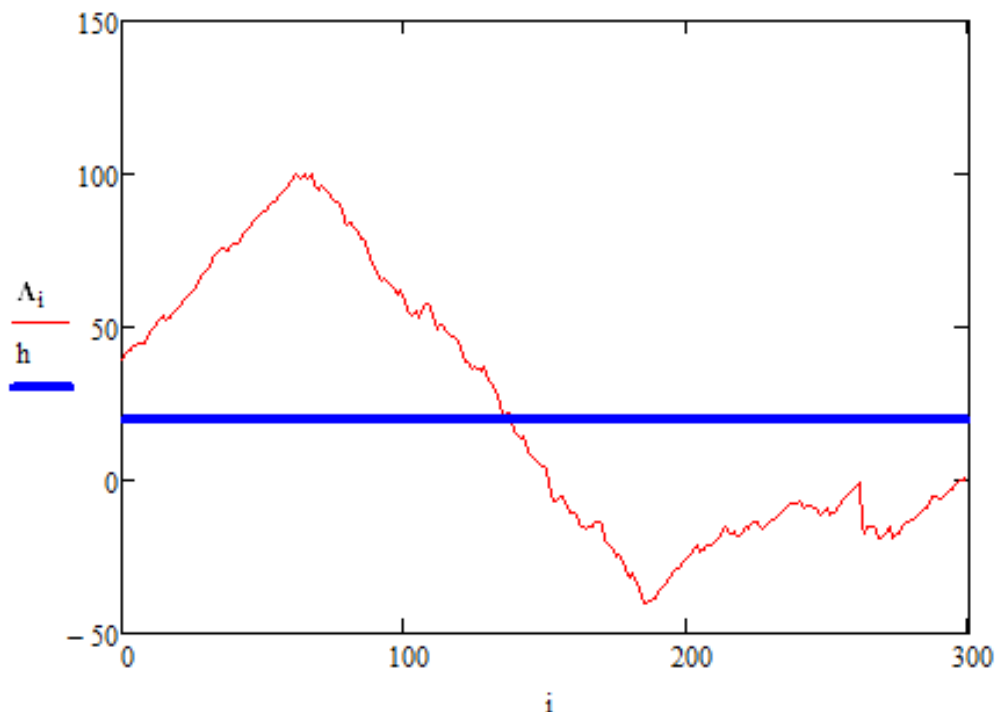


Рис. 7.41. Графік для детектування атаки з заданим пороговим значенням

4. Оцінимо момент початку і завершення атаки, що є відповідно максимумом та мінімумом функції. Отримаємо результат, що атака почалась на 62 секунді і закінчилась на 185 секунді.

7.6. Вимірювання параметрів мережі стільникового оператора

В даному розділі представлені результати проведених експериментальних досліджень ефективності функціонування сучасних стільникових мереж в Україні.

Для проведення експериментальних досліджень була розроблена схема експерименту (рис. 7.42).

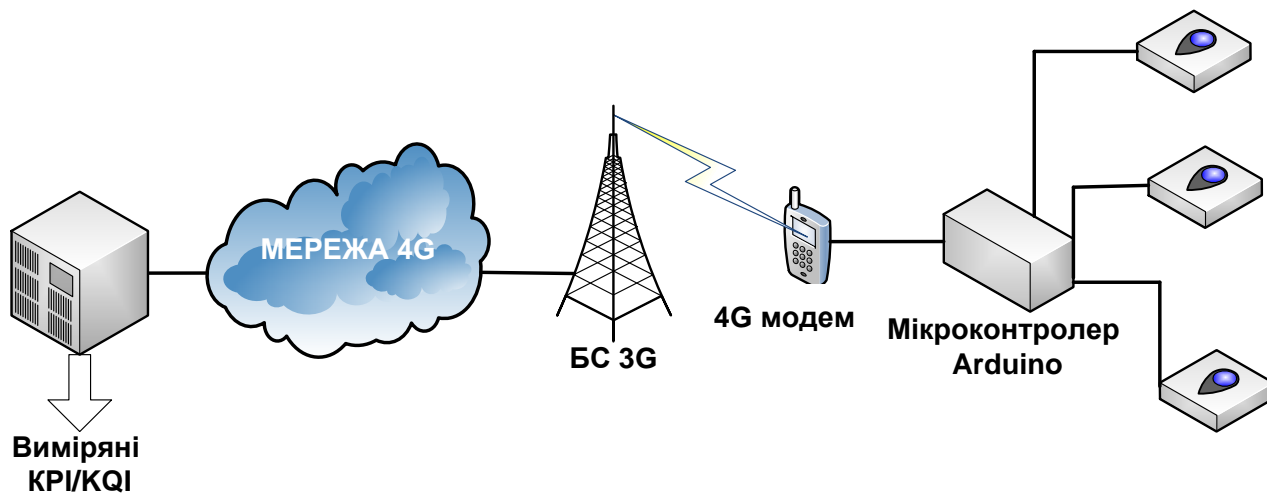


Рис. 7.42. Схема проведення експериментальних досліджень

Вимірювання ключових показників е стільникової мережі проводились за допомогою розробленого програмного додатку (рис. 7.36).

```

Main.java - test - [~/Documents/Projects/idea/test]
test > src > main > java > ua > deepz > Main >
Run Main
/Library/Java/JavaVirtualMachines/jdk1.8.0_112.jdk/Contents/Home/bin/java ...
***** Jitter *****
Jitter = 0.6440000000000031 CV = 0.012166323465513067 geo = 50.508747, 30.490574 host : google.com
*****
Download M/bit = 5.207081316 Upload M/bit = 4.9382716048 host : speedtest.tele2.net
Download M/bit = 5.8530785768 Upload M/bit = 5.3297801464 host : speedtest.tele2.net
Download M/bit = 5.447148052 Upload M/bit = 4.773269896 host : speedtest.tele2.net
Upload M/bit = 5.089058524 Download M/bit = 4.5615051656 host : speedtest.tele2.net
Upload M/bit = 4.3010752688 Download M/bit = 3.433732296 host : speedtest.tele2.net
Upload M/bit = 4.7932893952 Download M/bit = 4.8770976744 host : speedtest.tele2.net
Download M/bit = 6.1908546128 Upload M/bit = 5.5904961568 host : speedtest.tele2.net
Download M/bit = 5.6261623072 Upload M/bit = 5.0000 host : speedtest.tele2.net
Download M/bit = 5.9662930296

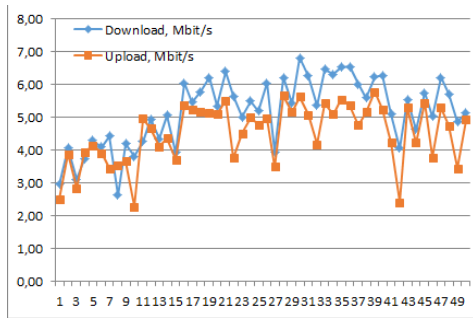
```

Рис. 7.43. Вимірювання основних показників продуктивності стільникової мережі

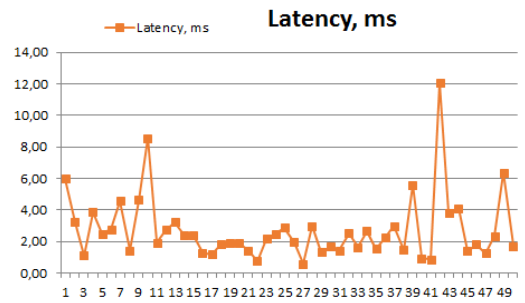
Для оператора стільникового зв'язку Vodafone (3G) було проведено вимірювання основних показників якості обслуговування, зокрема, швидкості передавання даних (по низхідному та висхідному каналах) (рис. 7.44 (а)) та затримки в мережі (рис. 7.44 (б)). Також були розраховані значення джитеру та коефіцієнту варіації затримки в мережі:

$$R_{download.cep} = 5,17 \text{ Мбіт/с}; R_{upload.cep} = 4,52 \text{ Мбіт/с}; t_{cep} = 2,73 \text{ мс}; J = 0,07 \text{ мс}; CV = 0,024.$$

Повні результати проведених експериментальних досліджень представлені у додатку Б.



(a)



(б)

Рис. 7.44. Результати експериментальних досліджень основних показників якості обслуговування для оператора Vodafone

Також в мережі Lifecell були проведені експериментальні дослідження основних KPI але вже для LTE. На рис. 7.45 представлені ці результати.

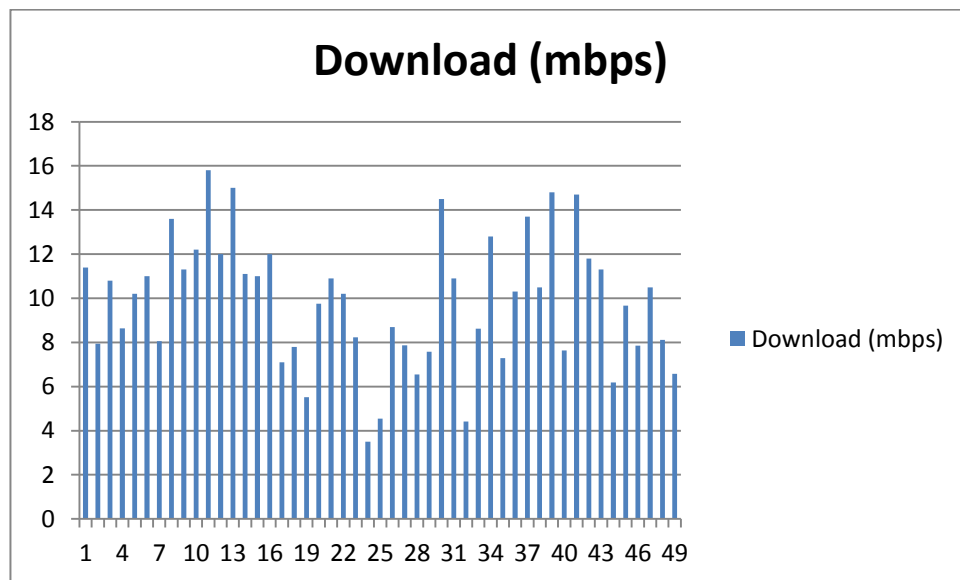


Рис. 7.45. Результати експериментальних досліджень основних показників якості обслуговування (швидкості завантаження) для оператора Lifecell

Отримані експериментальним шляхом дані свідчать про доволі низьку якість обслуговування абонентів стільникових мереж як 3G так і 4G в Україні в порівнянні із запущеними мережами LTE в світі. Проте виміряні характеристики свідчать про можливість використання її ресурсів для надання абонентам більшості послуг реального часу. Але, звертаючи увагу на значний ріст кількості підключень, збільшення мережевих пристроїв (IoT) необхідно підвищувати якість обслуговування, постійно контролюючи параметри мережі.

Висновки до розділу 7

Даний розділ цілком присвячений висвітленню проведених експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання з метою визначення ефективності запропонованих в даній дисертаційній роботі рішень. Таким чином, викладені в даному розділі положення, дозволяють зробити наступні висновки.

1. В даному розділі викладені результати моделювання покриття базових станцій в програмному середовищі Atoll. Ці результати дозволили зробити висновок про те, що метод оптимізації підсистеми базових станцій надає можливість при необхідності та можливості збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, що дозволяє мінімізувати необхідну кількість базових станцій для побудови мережі, а тому майже в 2 рази зменшити витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій.

2. Також в даному розділі було проведено оцінку виграшу від розвантаження радіоінтерфейсу базових станцій. Як показало проведене комп'ютерне моделювання, запропоновані удосконалення дозволяють зменшити навантаження на радіоінтерфейс мережі стільникової мережі до допустимого рівня, вдвічі збільшити кількість активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечити балансування навантаження в радіопідмережі.

3. В даному розділі було проведено моделювання потоків даних в транспортній мережі стільникового оператора. Результати свідчать про більш справедливу утилізацію транспортних каналів.

4. В даному розділі було описане програмне забезпечення, яке використовувалося для моделювання та дослідження мережі SDN. Були побудовані моделі різних структур рівня управління: централізованої, глобальної децентралізованої та локальної децентралізованої, проведено порівняння підходів до побудови архітектури рівня управління SDN. Проведено моделювання роботи Overlay мережі з використанням програмних комутаторів

OpenvSwitch за допомогою програмного забезпечення Mininet та MiniEdit. Результати моделювання дозволили впевнитись в необхідності розгортання глобальної децентралізованої архітектури керування.

5. Було проведено моделювання DoS атаки з метою її швидкого виявлення, що дозволило перевірити адекватність розробленого в розділі 6 алгоритму раннього виявлення DoS-атак.

6. Були проведені експериментальні дослідження основних показників якості обслуговування операторів стільникового зв'язку в Україні. Зокрема, тестувалися оператор Vodafone та Lifecell. Отримані результати свідчать про доволі низьку якість обслуговування абонентів та необхідність оптимізації структури мережі.

7. Результати, викладені в даному розділі, знайшли своє відображення в роботах [2, 4, 5].

Список використаних джерел у сьомому розділі

1. Atoll Overview: веб-сайт. URL: <http://www.forsk.com/atoll>
2. Одарченко Р.С., Харлай Л.О. Метод резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі з урахуванням основних характеристик мереж. *Технічні науки та технології*. 2018. №1(11). С. 89-96.
3. Mininet. An Instant Virtual Network on your Laptop (or other PC): веб-сайт. URL: <http://mininet.org/>.
4. Моделювання роботи overlay мереж SDN та дослідження їх основних характеристик / Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 284-290.
5. Zaliskyi M., Odarchenko R., Gnatyuk S., Petrova Y., Chaplits A. Method of traffic monitoring for DDoS attacks detection in e-health systems and networks / M. Zaliskyi, R. Odarchenko, S. Gnatyuk, Y. Petrova, A. Chaplits// Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies, Yekaterinburg, Russia, November 15, 2017.

РОЗДІЛ 8

МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ

8.1. Розроблена методологія

В результаті проведених досліджень було запропоновано методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж (рис. 8.1) [1, 2].

Вихідними даними для методології є кількість вже існуючих абонентів, які потенційно будуть абонентами мереж нових поколінь; вже існуючі апробовані технологічні рішення в світі, які потенційно можуть бути використані в Україні; вимоги від користувачів до мережі; грошові обмеження для операторів стільникового зв'язку.

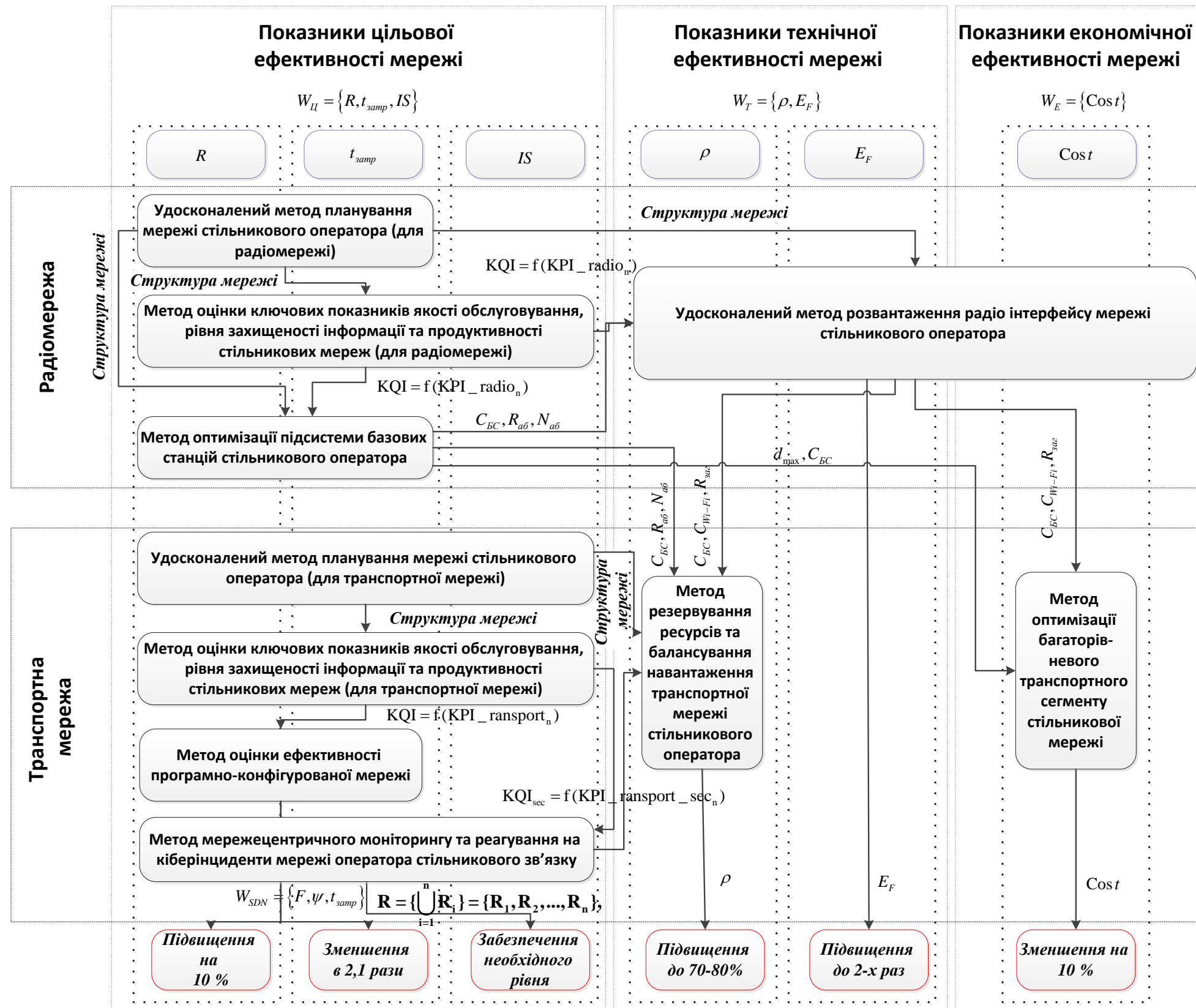
Методологія передбачає розробку альтернативних стратегій розвитку для операторів стільникового зв'язку [3, 4]. На базі однієї із стратегій необхідно проводити радіочастотний рефармінг, а потім первинне планування радіо- та опорної мережі. Після цього на основі обраних показників KPI/KQI буде проводитись моніторинг стану мережі та її безперервна оптимізація. В результаті буде підвищено енергоефективність, продуктивність мережі та максимізований економічний ефект від впровадження нових технологічних рішень. Методологія підвищення ефективності та захищеності стільникових мереж зв'язку (рис. 8.1) з наступної послідовності взаємопов'язаних між собою етапів [1].

Етап 1. Використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління [5, 6].

Етап 2. Використання методу оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж з метою вибору оптимальних показників для оцінки ефективності функціонування мережі стільникового оператора під час обслуговування абонентів та запровадження нових сервісів. [7, 8].

Ефективність функціонування стільникової мережі

$$W = \{W_U, W_T, W_E\}$$



Етап 3. Безперервна оптимізація мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора [9], удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi (Wireless Fidelity) [10-13], методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі [14, 15], удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора [16] та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку [17, 18].

Етап 4. Використання методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі для визначення основних показників ефективності рівня управління та вибору оптимальної структури цього рівня [19-21].

За допомогою розробленої методології операторам стільникового зв'язку вдається підвищити ефективність функціонування своїх мереж за рахунок збільшення радіусу зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, мінімізації необхідної кількості базових станцій для побудови мережі, збільшення вдвічі кількості активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечення балансування навантаження в радіопідмережі, підвищення економічної ефективності транспортної мережі, підвищення рівня надійності та захищеності мережі, оптимізацію утилізації транспортних каналів до 70-80%, проведення більш гнучкого та оперативного розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних до 2,1 раза для ієрархічної структури рівня управління.

8.2. Система моніторингу та оптимізації стану стільникової мережі

В сучасних умовах конкурентна боротьба в телекомунікаційній галузі точиться в сфері сервісів, де основну роль грають різноманітність послуг, якість, надійність та оперативність їх надання [22]. Великим корпоративним клієнтам операторів зв'язку вигідно отримувати усі сервіси зв'язку від одного постачальника. У той же час для приваблення абонентів телекомунікаційним

операторам потрібно постійно запускати та пропонувати користувачам нові додаткові послуги зв'язку на базі передових рішень та сучасних технологій, зокрема, інтелектуальні, мультимедійні послуги, послуги передачі даних, тощо. Тому необхідно постійно проводити моніторинг якості надання послуг та відповідно їх покращення.

Моніторинг якості послуг зв'язку здійснюється шляхом проведення вимірювань безпосередньо на мережі зв'язку. Цей моніторинг може спиратися як на отримані статистичні дані або контрольні вимірювання, так і на результати опитувань користувачів послуг зв'язку та поданих ними претензій [23].

Основними задачами, які вирішуються під час моніторингу якості надання телекомунікаційних послуг є:

- підтримка конкурентоспроможності на телекомунікаційному ринку;
- визначення необхідності розширення, модернізації мереж зв'язку для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентів;
- контроль основних показників якості надання телекомунікаційних послуг в умовах зростаючих обсягів передачі даних;
- залучення нових та збереження наявних абонентів шляхом оприлюднення результатів вимірювання рівнів якості телекомунікаційних послуг, що підтримуються мережею зв'язку.

Високі вимоги до якості надання послуг, оперативне підключення нових абонентів та необхідність розширення мережі ставлять перед операторами стільникового зв'язку принципово нові завдання безперервної оцінки показників ефективності функціонування мережі [7, 8] для її оптимізації, реконфігурації, розширення, визначення тарифної політики тощо.

Для забезпечення умов QoS необхідно здійснити ряд організаційно-технічних заходів, одним з базових елементів яких варто передбачити впровадження комплексної системи моніторингу стану телекомунікаційної мережі. При цьому, створення і функціонування даної системи не є самоціллю,

й повинно спиратися на техніко-економічні переваги і додаткові можливості, які повинні бути отримані при впровадженні даної системи.

Проте, слід відзначити, що майже кожній системі моніторингу, розглянутій у різноманітних джерелах, притаманні свої певні риси. Однак, дуже мала увага приділена системам моніторингу в стільникових мережах, зокрема в концепції IoT та IoE.

Система моніторингу, що розробляється, має відповідати певному набору критеріїв: повинна виявляти перевантаження і аналізувати причини їх виникнення в різних точках мережі та різних підсистемах (радіомережа, транспортна мережа, ядро мережі, абонентський пристрій тощо); мають задаватись граничні умови видачі сповіщень про перевищення заданого порогу, що налаштовуються безпосередньо користувачем системи (дають можливість завчасно надати інформацію для своєчасного перерозподілу наявних ресурсів, запобігаючи тим самим виникненню критичних перевантажень та збоїв у роботі мережі).

Таким чином, для ефективного управління ресурсами мережі стільникового оператора необхідно мати вичерпні дані по кожному фрагменту мережі в режимі реального часу. Така система моніторингу дозволить підвищити якість надання послуг, централізувати технічне обслуговування, планувати і оперативно впроваджувати нові сервіси, проводити розширення мережі, а також максимально ефективно використовувати наявні ресурси (обладнання, частотний діапазон тощо).

Спрощена структура стільникової мережі 3G/4G/5G представлена на рис. 8.2. До її складу включено систему моніторингу та оптимізації стану мережі. Вона здатна забезпечити роботу методу, представленого в [7, 8]. При цьому планується, що система моніторингу та оптимізації буде здатна проводити моніторинг якості обслуговування різних груп абонентів (IoT, телефонія, доступ до мережі Інтернет тощо) та відповідно підлаштовувати до їх потреб роботу мережі.

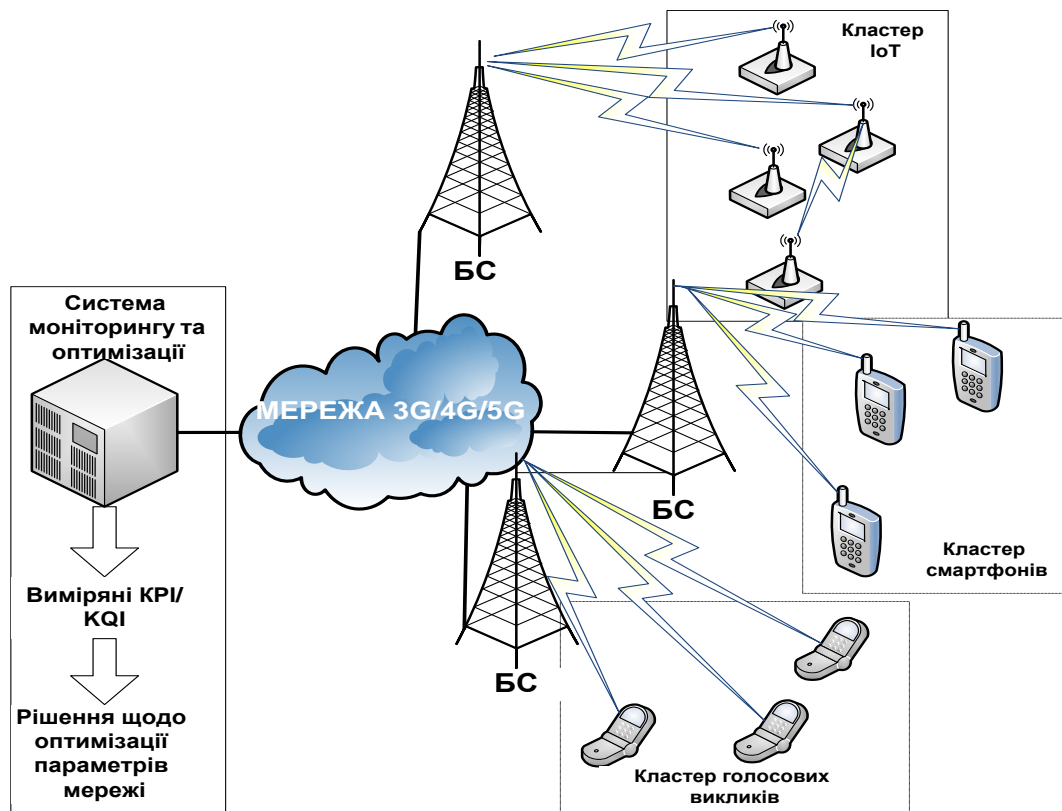


Рис. 8.2. Спрощена структура мережі стільникового зв'язку

Модель оцінки та оптимізації стану мережі. Для здійснення оцінки та оптимізації стану мережі із використанням теорії графів була розроблена відповідна модель (рис. 8.3), та запропоновано алгоритм роботи ЦМОСМ (центр моніторингу та оптимізації стану мережі) (рис. 8.4) [2].

Робота ЦМОСМ охоплює всю мережу від абонента до дата-центрів. Основною ж метою її роботи є забезпечення необхідного рівня обслуговування всіх груп абонентів. Тому в роботі центру передбачено обслуговування передусім запитів абонентів, яких не влаштовує якість надання послуг (невиконання умов SLA).

Таким чином, у випадку незадовільної роботи послуги, ЦМОСМ отримує запит абонента на її покращення. Першим етапом є відповідь з проханням перевірки справності термінального обладнання, оновлення налаштувань або його заміни. Після виконання цієї умови формуються критично важливі показники продуктивності мережі (KPI) у порядку спадання від найважливішого. Після цього система має порівняти актуальні значення з

нормами та при необхідності їх підвищити. У разі задовільних показників система переходить до наступного кроку, який являє собою перевірку стану покриття, навантаження у стільнику, працездатності ядра та транків і усунення відповідних наявних проблем. На кожному етапі система ЦМОСМ перевіряє актуальність проблеми. Якщо її усунуто, робота системи ЦМОСМ переходить в режим моніторингу.

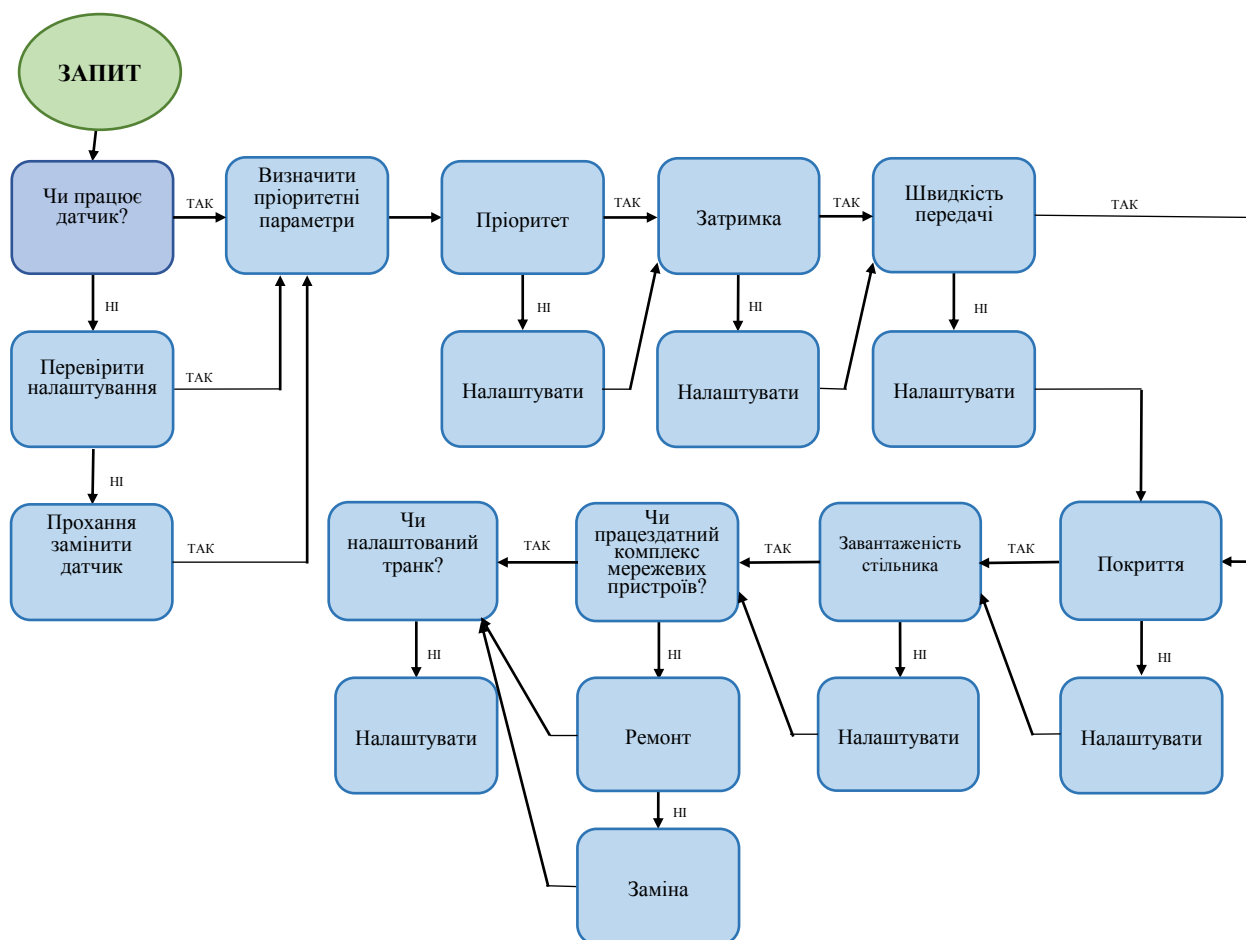


Рис. 8.3. Модель оцінки та оптимізації стану мережі

Першим етапом роботи алгоритму (рис. 8.4) є формування вимог KQI для відповідної послуги, після чого починається цикл, у якому виконується порівняльний аналіз з актуальними значеннями, і приймається рішення:

- а) при задовільному результаті перейти до наступного кроку,
- б) визначити критично важливі KPI, порівняти актуальні значення з нормами та підвищити їх. У разі задовільних результатів відбувається перехід до наступного кроку.

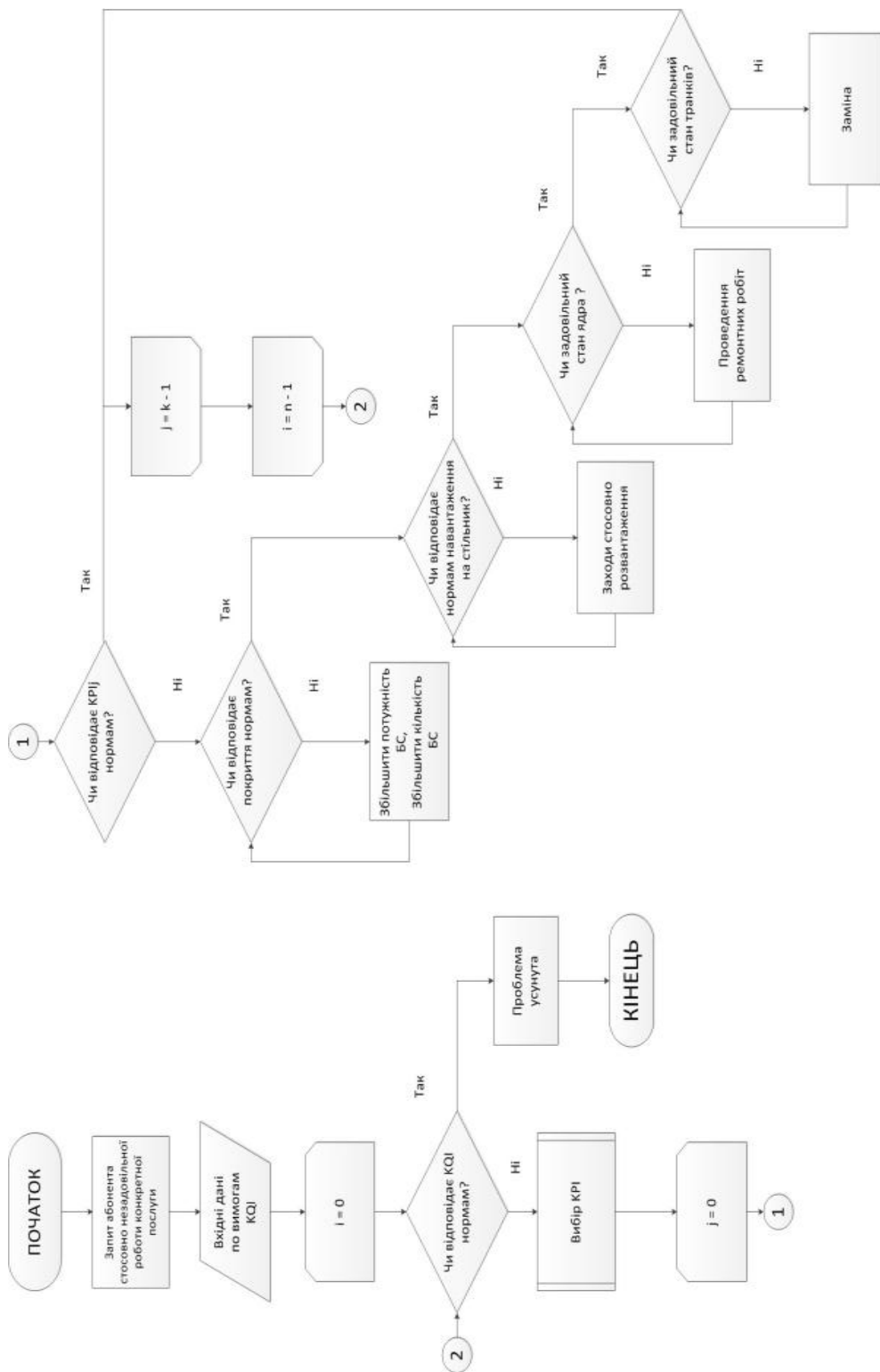


Рис. 8.4. Алгоритм роботи системи ЦМОСМ

Програмне забезпечення для оцінки ключових показників якості обслуговування. Для оцінки ключових показників якості обслуговування розроблено прототип додатку під операційну систему Android (рис. 8.5) [22].

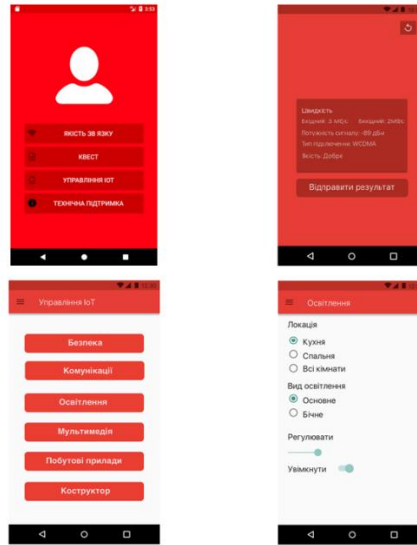


Рис. 8.5. Програмне забезпечення для оцінки ключових показників якості обслуговування

Це програмне забезпечення є додатковим для використання разом із ЦМОСМ і надає змогу вимірювати показники якості обслуговування зі сторони абонента в реальному часі. Для розробки додатка було використано програмне середовище Java і Android SDK. Додаток призначений для відстеження якості сигналу самим абонентом і надсилання результату в компанію для обробки і поліпшення роботи мережі в конкретній локації та управління IoT пристроями на відстані. Для прикладу розглянуто можливість керування освітленням, у якому абонент: обирає локацію, тип датчику, може вмикати чи вимикати його, регулювати інтенсивність або виконувати будь-яку дію з використанням таймеру, здійснювати бонусні квести, під час яких відбуваються заміри якості обслуговування у локаціях, в яких зацікавлений оператор. При розробці додатку була використана стороння бібліотека JSpeedTest для отримання швидкості вхідного і вихідного з'єднання.

Після того як зібрані дані про якість обслуговування, вони передаються до ще одного розробленого програмного забезпечення для аналізу.

Дане програмне забезпечення для аналізу стану мережі працює наступним чином.

1. Вибирається набір даних, таблиця певного формату, що представляє собою набір даних-показників мережі, зібраних певною програмою (рис. 8.6).

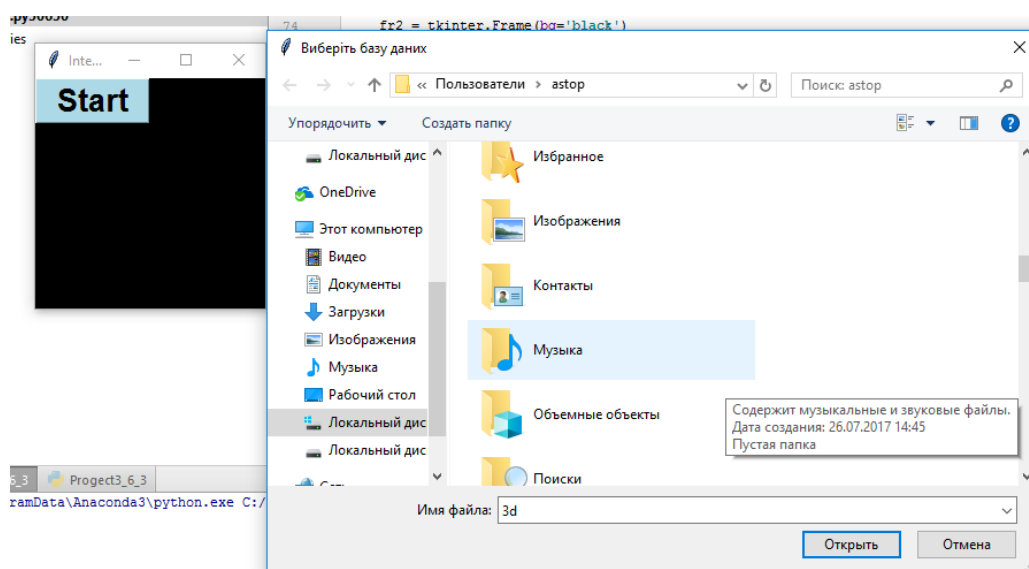


Рис. 8.6. Вибір даних для аналізу

2. Дані з таблиці аналізуються програмою. У разі невідповідності стандартам показника KQI, програма проводить аналіз показників KPI, з урахуванням кореляції показника KPI до показника KQI, визначає ті показники, через незадовільні значення яких показник KQI не відповідає нормам. Алгоритм визначення наступний: вибираються усі показники KPI, при яких KQI вище мінімального значення норми, і знаходиться середнє значення для кожного показника KPI серед усіх виділених його значень.

Далі програма перебирає показники KPI, за яких показник KQI менший за норму. Кожне значення кожного KPI перевіряється на відповідність знайденому середньому арифметичному і у разі невідповідності даний KPI потрапляє до списку ймовірних проблем, серед яких потім виділяється найімовірніша проблема.

Якщо проблема наявна, а причина все ще не встановлена, програма проводитиме повторні тести із усе більшими коефіцієнтами збільшення середнього арифметичного доти, доки не буде виявлено імовірну проблему.

3. Програма відкриває нове вікно із двома вкладками, в яких графічно відображає результати роботи.

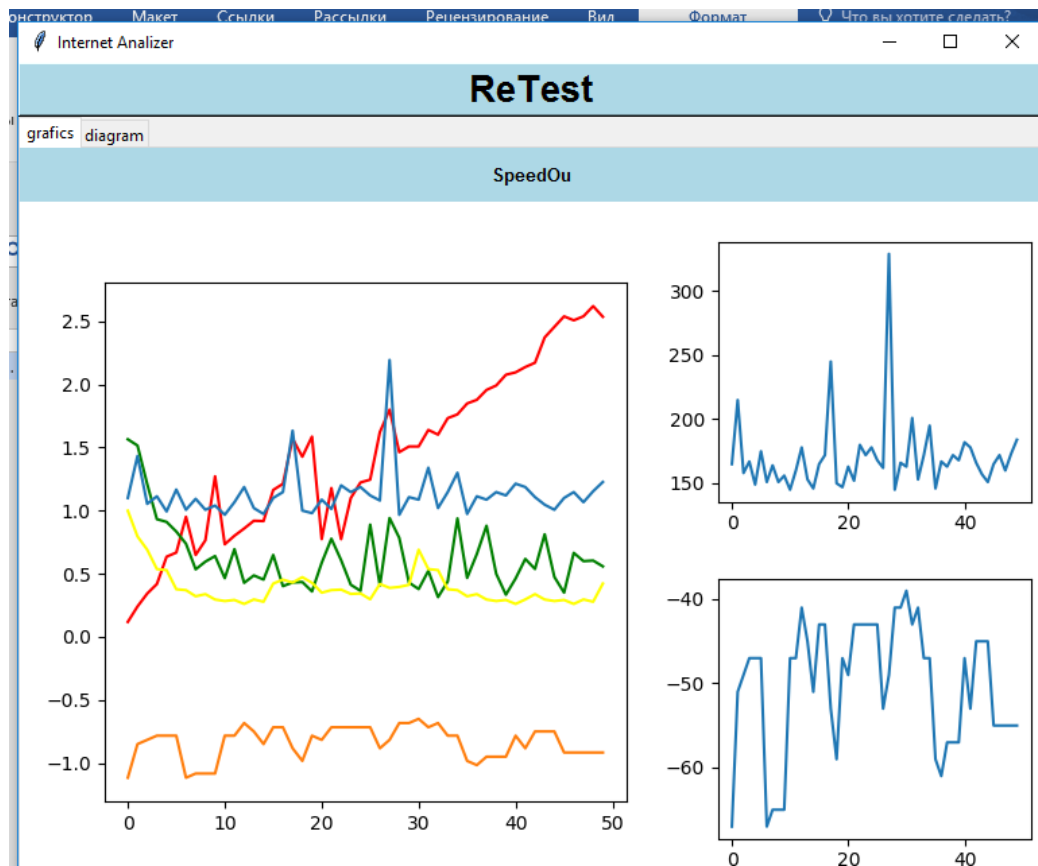


Рис. 8.7. Результати аналізу

Перша вкладка містить графіки показників KQI і KPI, а у другій за допомогою піктограм вказано, які саме апаратні елементи мережі найімовірніше є причиною невідповідності показників (рис. 8.8).

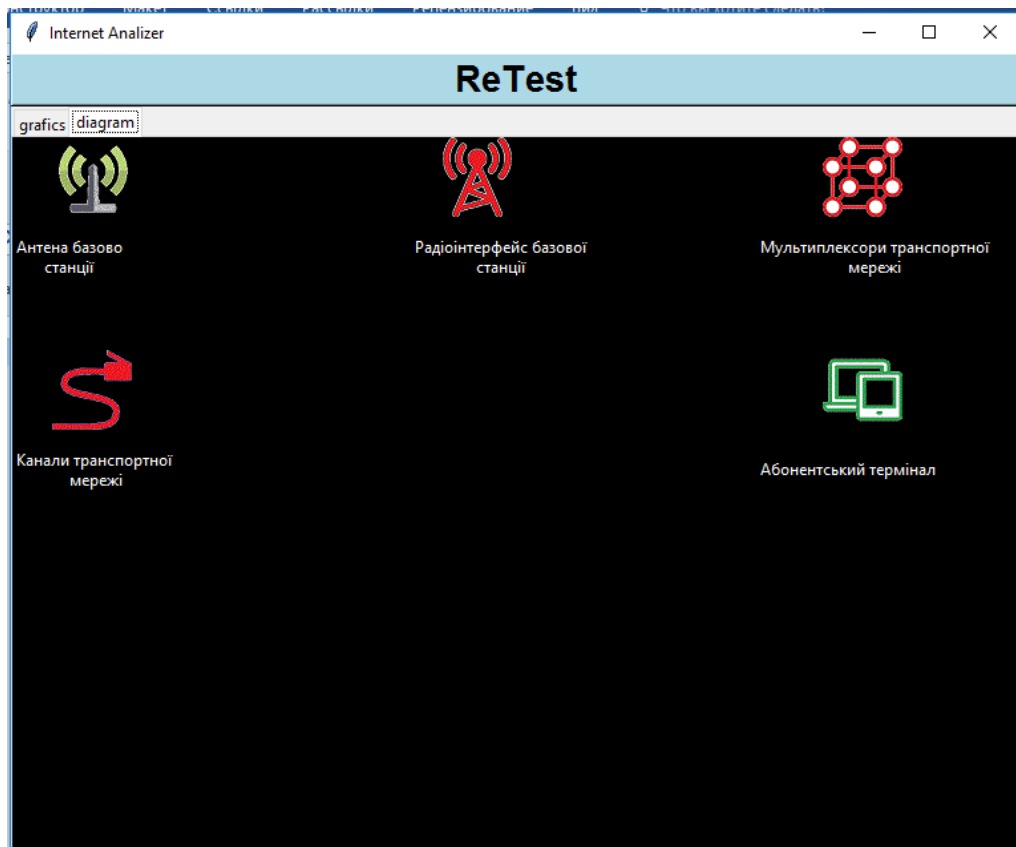


Рис. 8.8. Виявлення невідповідних елементів

Таким чином, розроблений ЦМОСМ має ряд наступних переваг:

- вартість системи покривається за рахунок мінімальних часових затрат і коштів для точного визначення проблеми;

- програмне забезпечення системи дає змогу перевірити якість мережі у будь-якій локації і зробити висновки щодо необхідності покращення роботи мережі;

- абоненти приймають участь в перевірці якості роботи мережі за рахунок квестів, коли оператор сам задає локацію вимірів та самостійно, коли того бажає абонент;

- клієнтське програмне забезпечення дозволяє абоненту корегувати роботу мережі, що викликає довірчі стосунки з оператором;

- абоненти можуть керувати IoT за допомогою клієнтського програмного забезпечення, що збільшить попит на використання послугами мобільного оператора, який його буде пропонувати.

Висновки до розділу 8

Даний розділ присвячений узагальненню методології підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку, розробці структури системи моніторингу та оптимізації стану мережі, а також відповідного алгоритмічного та програмного забезпечення. В даному розділі були оприлюднені наступні результати.

1. В даному розділі було мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi, методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку.

2. Визначено, що високі вимоги до якості надання послуг, оперативне підключення нових абонентів та розширення мережі ставлять перед операторами стільникового зв'язку принципово нові завдання безперервної оцінки показників використання мережі для її оптимізації, реконфігурації, розширення, визначення тарифної політики. Оскільки якість обслуговування в більшості випадків не задовольняє висунутим вимогам, то було розроблено структуру системи моніторингу та оптимізації стану мережі.

3. Для забезпечення роботи даної системи була розроблена відповідна модель, на основі якої розроблено алгоритм роботи системи ЦМОСМ. Крім того, для оцінки ключових показників якості обслуговування з боку абонента

було розроблено прототип додатку під операційну систему Android. Цей додаток також дозволяє абоненту курувати IoT пристроями.

5. Результати, викладені в даному розділі, знайшли своє відображення в роботах [1 – 22].

Список використаних джерел у восьмому розділі

1. Одарченко Р.С. Методологія підвищення ефективності стільникових мереж зв'язку. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: матеріали доп. учасн. III Всеукраїнської науково-практичної конференції, 22-25 лютого 2017 р. К.;, 2017. С.120-124.

2. Одарченко Р.С. Розробка структури системи моніторингу та оптимізації мережі стільникового оператора. *Наукоємні технології*. 2017. №3(35). С.197-203.

3. Одарченко Р.С., Конахович Г.Ф., Ткаченко В.В. Методика вибору проектного рішення для розгортання захищеної мережі LTE. *Захист інформації*. 2014. № 1 (16). С. 63-68.

4. . Одарченко Р.С. Методологія підвищення ефективності стільникових мереж зв'язку. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації:

5. Одарченко Р.С. Удосконалений метод планування мережі LTE // Бараннік В.В. Наукоємні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія [під загальною редакцією В. В. Баранніка, В. М. Безрука] – Х. : Видавництво «Стиль-видат», 2018. С. 293-302.

6. Одарченко Р.С., Мирутенко Л.В., Даков С.Ю. Удосконалений метод побудови опорного сегменту мережі LTE. *Наукоємні технології*. 2018. №1(37). С.18-26.

7. Одарченко Р.С., Скульська О.Ю., Гнатюк В.О. Метод оцінки ключових показників захищеності в сучасних стільникових мережах. *Безпека інформації*. 2017. № 1(23). С. 19-26.

8. Odarchenko R. Security key indicators assessment for modern cellular networks /R. Odarchenko, V. Gnatyuk, S. Gnatyuk, A. Abakumova// Proceedings of the 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, (SAIC 2018), Kiev, Ukraine, October 8-12, 2018. – P. 267-270.

9. Odarchenko R. Mobile operators base station subsystem optimization method/ R. Odarchenko, N. Dyka, O. Poligenko, L.Kharlai, A. Abakumova // Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 10-13, 2017. – P. 29-33.

10. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Стецюра Ю.І. Розвантаження радіоінтерфейсу мережі lte шляхом застосування концепції Hotspot 2.0 *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. Житомир: ЖВІ ДУТ. 2014. Вип.17. С.63-70.

11. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П. Використання концепції мереж SDN для розподілу трафіку між мережами LTE та Wi-Fi. *Наукоємні технології*. 2014. Вип.4 (24). С.432-437.

12.Roman Odarchenko, Baruch Altman, Rui Aguiar and Yevgeniya Sulema. Multilink Approach for the Content Delivery in 5G Networks: Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications. Science and Technology(PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. – P.140-144

13. Odarchenko R. Traffic offload improved method for 4G/5G mobile network operator /R. Odarchenko, A. Abakumova, O. Polihenko, S. Gnatyuk.// Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 – Proceedings 2018-April, P. 1051-1054.

14. Odarchenko R. Transport network optimization methods of mobile operators in Ukraine /R. Odarchenko, Y. Kochergin, A. Abakumove, D. Vergeles//

Proceedings of the 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON, Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June 2017 – P. 1107-1112.

15. Odarchenko R. Improved Method of Routing in UAV Network / R. Odarchenko, S. Gnatyuk, T. Zhmurko, O. Tkalich // Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (APUAVD), Kyiv, Ukraine, October 13-15, 2015: Vol. 1. P. 294-297.

16. Одарченко Р.С., Харлай Л.О. Метод резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі з урахуванням основних характеристик мереж. *Технічні науки та технології*. 2018. №1(11). С. 89-96.

17. Удосконалена архітектура системи безпеки стільникових мереж нового покоління / Р.С.Одарченко, В.О. Гнатюк В.О., Є.О.Самойлик, В.В. Котелянець // *Наукоємні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія [за ред. В. В. Баранніка, В. М. Безрука]* – Х. : Видавництво «Стиль-видат», 2018. – С. 293-302.

18. Одарченко Р.С. Розробка системи управління кіберінцидентами в мережах LTE. *Безпека інформації*. 2018. № 2, т.24. С. 84-90.

19. Odarchenko R. Evaluation of SDN network scalability with different management level structure /R. Odarchenko, O. Tkalich, G. Konakhovych, A. Abakumova// Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 4-6, 2016. – P. 128-131.

20. Odarchenko R. Software-Controlled Network SDN Reliability Calculation/ R. Odarchenko, S. Dakov, O. Oksiuk, L. Dakova// Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. – P 99-103.

21. Моделирование работы overlay сетей SDN та дослідження їх основних характеристик / Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології* . 2016. № 3 (31). С. 284-290.

22. Одарченко Р.С., Харлай Л.О., Абакумова А.О., Чмих П.А. Програмне забезпечення для оцінки ключових показників якості обслуговування зі сторони абонента стільникової мережі. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. №3(59). С. 56-61.

23. Бреславський В. О. Створення комплексної системи моніторингу з використанням аналізаторів сигналізацій телекомунікаційних систем. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2014. №1(29). С. 69-75

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, складає вирішення науково-технічної проблеми, яка полягала в необхідності підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. У дисертаційній роботі отримані такі теоретичні та практичні результати.

1. Проведений аналіз якості обслуговування абонентів стільникових мереж в Україні з метою визначення ефективності їх функціонування та захищеності. Було визначено вимоги до стільникових мереж нового покоління як в світі, так і в Україні зокрема. Це дозволило визначити напрями, за якими необхідно проводити підвищення ефективності функціонування стільникових мереж.

2. Аналіз якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж LTE в світі та стільникових мереж 4G в Україні дозволив встановити, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів (цільова ефективність) перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування радіомереж, транспортних підсистем, методів керування та забезпечення кібербезпеки.

3. Удосконалено метод планування мережі стільникового оператора за рахунок послідовного визначення стратегії розвитку оператора стільникового зв'язку, найбільш важливих показників якості обслуговування, виборі обладнання із множини доступних альтернатив, виборі послуг для абонентів, оцінці зон радіопокриття із врахуванням особливостей рельєфу та кліматичних умов, корегування розташування базових станцій, удосконаленій процедурі частотного планування, попередній оцінці капітальних витрат на побудову мережі.

Удосконалений метод надає змогу операторам стільникового зв'язку проводити більш точну оцінку зон радіопокриття, вибір ключових показників якості обслуговування, більш ефективне частотне планування та розрахунок капітальних витрат, що в свою чергу дозволяє оцінити доцільність побудови

варіанту мережі стільникового зв'язку. На основі даного удосконаленого методу розроблено навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіопокриття базових станцій мережі LTE.

4. Вперше розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж, який полягає у послідовному визначенні множини оцінюваних послуг, виборі на основі кореляційно-регресійного аналізу статистичних даних якості обслуговування та рівня захищеності оптимальних критеріїв оцінювання функціонування мережі, безпосередній їх оцінці та порівнянні із допустимим рівнем.

Розроблений метод дозволяє проводити оцінку найбільш важливих показників якості функціонування та захищеності мережі стільникового оператора з метою їх постійного контролю та оптимізації під час впровадження нових сервісів під час обслуговування абонентів.

5. Вперше розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора, який полягає в послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми з урахуванням обмежень по якості обслуговування, допустимій смузі частот, кількості активних абонентів, використанні мультистандартних активних антенних систем та програмно-конфігурованого радіоінтерфейсу.

Запропонований метод дозволяє при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, що дозволяє мінімізувати необхідну кількість базових станцій для побудови мережі, а тому майже в 2 рази зменшити витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій, тобто підвищити економічну ефективність мережі.

6. Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора з використанням підмережі стандарту не-3GPP шляхом використання нових алгоритмів вибору мережі для передачі даних, використання комбінацій протоколів MTCP, TCP, SCTP на різних ділянках мережі та в залежності від типу надаваних послуг.

Запропоновані удосконалення дозволяють зменшити навантаження на радіоінтерфейс мережі стільникової мережі до допустимого рівня, вдвічі збільшити кількість активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечити балансування навантаження та підвищення ефективності функціонування радіопідмережі.

7. Вперше розроблено метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, який полягає у послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми станцій радіорелейного зв'язку з урахуванням технологічних обмежень до пропускної здатності каналів, оптимізації структури кожного шару із врахуванням технологічних обмежень цього рівня, оснований на різноманітних параметрах функціонування мережі та показниках вартості.

Запропонований метод дозволяє здійснити удосконалення структури транспортної мережі при переході до мереж нових поколінь, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та підвищення економічної ефективності транспортної мережі до 10%.

8. Удосконалено метод маршрутизації із резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки за рахунок послідовного визначення характеристик мережі (пропускна здатність, затримка, завантаженість каналу), визначення необхідного резерву в каналі зв'язку, визначення альтернативних шляхів передавання даних з урахуванням ризиків інформаційної безпеки, розробки порогових значень для різних типів сервісів та виконання перерозподілу потоків.

Запропонований метод дозволяє, надаючи підвищений рівень надійності та захищеності мережі, підвищити ефективність використання транспортних каналів до 70-80%.

9. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі, що використовується для керування мережею стільникового оператора та впровадження нових сервісів, що полягає

у послідовному виборі оптимальної архітектури сегменту програмно-конфігурованої мережі, оцінці основних показників ефективності її функціонування.

Запропонований метод дозволяє проводити більш гнучке та оперативне розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних до 2,1 раза для ієрархічної структури.

10. Вперше розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, який полягає в удосконаленні архітектури стільникових мереж зв'язку шляхом введення додаткових безпекових функцій та послідовному зборі інформації про виникнення кіберінцидентів в стільниковій мережі, виявленні типів кібератак, об'єктів та ступеня впливу, реагування на кібератаку та збереження інформації про кіберінцидент в спеціалізовану базу даних.

Запропонований метод дозволяє в режимі реального часу проводити моніторинг стану забезпечення кібербезпеки, підвищувати її рівень та відповідно ефективність функціонування стільникової мережі.

11. Вперше розроблено методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi, методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного

моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку.

Розроблена методологія надає можливість за рахунок безперервного моніторингу ключових показників якості функціонування мережі оперативно підвищувати ефективність функціонування стільникової мережі та якість обслуговування абонентів.

12. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, що дозволило верифікувати запропоновані методи, моделі та методологію і підтвердити їх ефективність у контексті підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. Результати дисертації впроваджено у діяльність ТОВ «Українські новітні технології» (акт від 24.07.2017), ТОВ «М.М.Д Смарт Україна» (акт від 11.12.2018), ДержНДІ спеціального зв'язку та захисту інформації (акт від 07.02.2017), Bundleslab KFT (акт від 03.12.2018), а також використовуються у навчальному процесі Центру перепідготовки та підвищення кваліфікації при Київській обласній державній адміністрації (акт від 23.08.2017), Національного авіаційного університету (акт від 11.12.2018), Державного закладу «Київський коледж зв'язку» (акт від 06.12.2017) та Університету у Бельсько-Бялій (акт від 18.05.2018) для підвищення ефективності підготовки фахівців з телекомунікацій.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час планування безпроводових мереж стандарту LTE та 5G, розробки обладнання та програмного забезпечення для систем передачі даних, а також в навчальному процесі.

ДОДАТОК А
КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА
ЗАХИЩЕНОСТІ

Показники, які характеризують Доступність послуг голосової телефонії (Accessibility Performance , AP)	Показники доступності зв'язку (послуги голосової телефонії)	<i>Відсоток неуспішних викликів (Q_{нув}) для:</i>	Кількість неуспішних викликів (N _{нув}) Загальна кількість викликів за період випробування (N _{зв})	
		а) міжнародних викликів;		не встановлюється
		б) національних викликів:		не більше 10%
		- міжміських викликів; - місцевих викликів; - місцевих викликів до служб екстреної допомоги ¹⁾ (СЕД); - викликів до абонентів рухомого (мобільного) зв'язку; - викликів до системи інформаційно-довідкового обслуговування (СІДО) ОПТ		
	Показники швидкості завершення викликів	<i>Нормативний час завершення виклику (T_{нчзв}) для:</i>		
		а) міжнародних викликів;		не встановлюється
		б) національних викликів: - міжміських викликів; - місцевих викликів; - місцевих викликів до СЕД; - викликів до абонентів рухомого (мобільного) зв'язку		не більше 10 с
		<i>Відсоток викликів, які відповідають нормативам за часом завершення виклику (Q_{чзв}) для:</i>	Час завершення виклику (T _{чзвк}) Кількість викликів, які відповідають нормативам за часом завершення	
		а) міжнародних викликів;		не встановлюється
		б) національних викликів:		не менше 90%

		<ul style="list-style-type: none"> - міжміських викликів; - місцевих викликів; - місцевих викликів до СЕД; - викликів до абонентів рухомого(мобільного) зв'язку 	<p>виклику (Nчвзв)</p> <p>Загальна кількість викликів,</p> <p>зроблених за період випробування</p> <p>або за звітний період (N зкпв)</p> <p>Тривалість звітного періоду ²⁾ (Тзвп)</p>	
<p>Показники, які характеризують доступність послуг голосової телефонії (Accessibility Performance, AP)</p>	<p>Показники швидкості відповіді системи інформаційно-довідкового обслуговування (СІДО) ОПТ</p>	<p>Нормативний час відповіді СІДО ОПТ (Тнчвс)</p>		
		<p>Відсоток викликів, які відповідають нормативам за часом відповіді СІДО ОПТ (Qчвсд)</p>	<p>Час відповіді СІДО ОПТ (Тчвсо)</p> <p>Кількість викликів, які відповідають нормативам за часом відповіді СІДО ОПТ (Nввсд)</p> <p>Загальна кількість перевірених викликів до СІДО ОПТ, зроблених за період випробування або за звітний період (Nзквс)</p> <p>Тривалість звітного періоду (Тзвп)</p>	
	<p>Показники готовності таксофонів</p>	<p>Відсоток справних таксофонів (Qсптф)</p>	<p>Кількість справних таксофонів (Nкстф)</p> <p>Загальна кількість перевірених таксофонів (N_{зкпт})</p>	
<p>Показники, які характеризують повноцінність надання послуг голосової телефонії (Integrity Performance, IP)</p>	<p>Показники якості передачі мовної інформації</p>	<p>Нормативний рівень якості передачі мовної інформації (Qпрям) для методів оцінки:</p>		
		<p>-за автоматичним методом вимірювання якості передачі мови (PESQ);</p>		<p>не менше 3,0*</p> <p>*Результати спостережень повинні забезпечувати відносну точність не менше 20% з рівнем довір не менше 80%. Під час здійснення контролю показників якості з кінцевого обладнання споживачів телекомунікаційних послуг або з точки</p>

				підключення кінцевого обладнання споживачів до телекомунікаційної мережі результати спостережень повинні забезпечувати відносну точність не менше 60% з рівнем довіри не менше 80%.
		-з використанням одиниць рейтингу R (Quality Rating);		не менше 70,0
		-за середньою експертною оцінкою (MOS)		не менше 3,5
		Відсоток з'єднань, що відповідають нормативам за якістю передачі мовної інформації (Qзвям) для методів оцінки:	Рівень якості передачі мовної інформації (Qряпм)	
		-за автоматичним методом вимірювання якості передачі мови (PESQ);	Кількість з'єднань, які відповідають нормативам за якістю передачі мовної інформації (Nзвям)	не менше 70%
		-з використанням одиниць рейтингу R (Quality Rating);	Загальна кількість з'єднань, встановлених за період випробування або за звітний період(Nзкз)	не менше 80%
		-за середньою експертною оцінкою (MOS)	Тривалість звітного періоду (Tзвп)	не менше 80%
Показники, які характеризують безперервність надання послуг голосової телефонії (Retainability Performance –RP)	Показники безперервності надання послуги	Відсоток встановлених з'єднань, які закінчилися передчасним роз'єднанням не за ініціативою абонента (Qрвз) для:	Кількість встановлених з'єднань, які закінчилися передчасним роз'єднанням не за ініціативою абонента (Nзпр)	
		а) міжнародних викликів;	Загальна кількість з'єднань, встановлених за період випробувань або за звітний період (Nзквз)	не встановлюється
		б) національних викликів:	Тривалість звітного періоду (Tзвп)	не більше 5%
		- міжміських викликів; - місцевих викликів; - місцевих викликів до СЕД;		
		- викликів до абонентів рухомого (мобільного) зв'язку		

Показники, які характеризують безпечність послуг голосової телефонії (Security Performance, SP)	Показники конфіденційності надання послуги	Кількість звернень щодо сторонніх підключень з розрахунку на одну лінію доступу ³ за рік (Z зспр)	Кількість звернень щодо сторонніх підключень, що надійшло за рік (Nзспр) Кількість ліній доступу ³ , задіяних та підключених до мережі на початок року (Nклдп) Кількість ліній доступу ³ , задіяних та підключених до мережі на кінець року (Nклдк)	
Вид показників	Показники (параметри) та їх позначення	Параметри для розрахунку показників та їх позначення		Норми
Послуги відеотелефонії (Video Telephony)				
Показники, які характеризують доступність послуги (Service Accessibility, SAc))	Відсоток неуспішних спроб встановлення аудіо/відеоз'єднань ($Q(n_{a/v})$)	Кількість неуспішних спроб встановлення аудіо/відеоз'єднання ($N n_{спр}_{a/v}$) Загальна кількість спроб встановлення аудіо/відеоз'єднання ($N_{спр}_{a/v}$)		
	Нормований час встановлення аудіо/відеоз'єднання ($T n_{вст}_{a/v}$)			
	Відсоток аудіо/відеоз'єднань, встановлених з перевищенням нормованого часу ($Q_{невч}_{a/v}$)	Момент часу, коли розпочинається передавання аудіо- та відеоінформації ($t_{старт}_{a/v}$) Момент часу, коли абонент, який викликає, отримує сигнал прийняття виклику ($t_{прийн}_{викл}$) Відсоток аудіо/відеоз'єднань, які не задовольняють нормам щодо часу встановлення з'єднання ($N_{невч}_{спр}_{a/v}$) Загальна кількість встановлених аудіо/відеоз'єднань за період випробування або звітний період ($N_{спр}_{a/v}$)		
Показники, які характеризують повноту послуг (Service Integrity, SI)	Нормований рівень якості передачі мовної інформації			
	Нормований рівень якості передачі відеоінформації Середня однобічна затримка	Потребує подальшого вивчення та визначення.		

	від кінця до кінця ($T_{a/v}$)	Затримка при кодуванні аудіо/відео-інформації (найповільнішому) в першому напрямку (a) Затримка при передаванні аудіо/відео-інформації (найповільнішому) в першому напрямку(b) Затримка при декодуванні аудіо/відео-інформації (найповільнішому) в першому напрямку (c) Затримка при кодуванні аудіо/відео-інформації (найповільнішому) в другому напрямку (d) Затримка при передаванні аудіо/відео-інформації (найповільнішому) в другому напрямку (e) Затримка при декодуванні аудіо/відео-інформації (найповільнішому) в другому напрямку (f)	
	Відсоток відеотелефонних з'єднань, які не задовольняють нормам щодо затримки для відеотелефонних з'єднань ($Q_{неяк_втел_затр}$)	Кількість відеотелефонних з'єднань, які не задовольняють нормам щодо затримки для відеотелефонних з'єднань ($N_{затр}$) Загальна кількість встановлених відеотелефонних з'єднань за період випробування або звітний період ($N_{спр_a/v}$)	
Послуги пошуку інформації в Web (Web Browsing, HTTP)			
Показники, які характеризують доступність послуги (Service Accessibility, SAc)	Відсоток неуспішних спроб встановлення TCP/IP-з'єднання для отримання послуги HTTP ($Q_{н_HTTP}$)	Кількість неуспішних спроб встановлення TCP/IP -з'єднання з сервером ($N_{н_спр_IP_з'єдн}$) Загальна кількість спроб встановлення TCP/IP-з'єднання з сервером за період випробування або звітний період ($N_{спр_IP_з'єдн}$)	
	Нормований час встановлення TCP/IP-з'єднання для доступу до послуги HTTP ($T_{н_всп_посл_HTTP}$)		
	Відсоток TCP/IP -з'єднань для доступу до послуги HTTP, при встановленні яких відбулось перевищення нормованого часу ($Q_{невч_IP}$)	Момент успішного доступу до IP-послуги ($t_{усп_дост_IP_посл}$) Момент часу, коли абонент надсилає запит на доступ до послуги ($t_{поч_IP_посл}$) Кількість TCP/IP-з'єднань, при встановленні яких відбулось перевищення нормованого часу ($N_{невч_IP_з'єдн}$) Загальна кількість спроб встановлення TCP/IP-з'єднань за період випробування або звітний період ($N_{спр_IP_з'єдн}$)	
Показники, які характеризують повноту послуг (Service Integrity,	Середня швидкість передавання даних ($V_{шв_HTTP}$)	Об'єм переданих даних споживача ($W_{кор_дан}$) Момент отримання останнього пакета web-	

SI)		сторінки (повного завантаження контенту) ($T_{ПД_зав}$) Момент отримання першого пакета web-сторінки (початок завантаження контенту)	
Послуги із застосуванням протоколу безпроводових застосувань (WAP)			
Показники, які характеризують доступність послуги (Service Accessibility, SAc)	Відсоток неуспішних спроб TCP/IP-з'єднання з WAP-сервером ($Q_{н_з'єдн_WAP}$)	Кількість неуспішних спроб встановлення TCP/IP-з'єднання з WAP-сервером ($N_{незусп_спр_з'єдн_WAP}$) Загальна кількість спроб з'єднання з WAP-сервером за період випробування або звітний період ($N_{спр_з'єдн_WAP}$)	
	Відсоток неуспішних сеансів доступу до WAP-сторінки ($Q_{н_сеанс_WAP}$)	Кількість неуспішних спроб доступу до WAP-сторінки ($N_{незусп_спр_дост_WAP_стор}$) Загальна кількість спроб доступу до сторінки WAP-сторінки за період випробування або звітний період ($N_{спр_дост_WAP_стор}$)	
	Нормований час встановлення TCP/IP-з'єднання з WAP-сервером ($T_{н_дост_WAP}$)	Момент, коли TCP/IP-з'єднання WAP встановлено ($t_{WAP_з'єдн_встан}$) Момент надсилання запиту на встановлення TCP/IP-з'єднання WAP (вибір посилання або введення URL-адреси) ($t_{зап_WAP_з'єдн}$)	
	Відсоток TCP/IP-з'єднань з WAP-сервером, при встановленні яких відбулось перевищення нормованого часу ($Q_{невч_WAP_IP}$)	Кількість TCP/IP-з'єднань, при встановленні яких відбулось перевищення нормованого часу ($N_{невч_WAP_IP_з'єдн}$) Загальна кількість спроб встановлення TCP/IP-з'єднань за період випробувань або звітний період ($N_{спр_WAP_IP_з'єдн}$)	
	Нормований час встановлення сеансу доступу до WAP-сторінки ($T_{н_сеанс_WAP}$)	Момент, коли обрану сторінку WAP повністю завантажено ($t_{поява_WAP_стор}$) Момент вибору WAP-сторінки (вибір посилання або введення URL-адреси) ($t_{вибір_WAP_стор}$)	
	Відсоток сеансів доступу до WAP-сторінки, при встановленні яких відбулось перевищення нормованого часу ($Q_{невч_сеанс_WAP}$)	Кількість сеансів доступу до WAP-сторінки, при встановленні яких відбулось перевищення нормованого часу ($N_{невч_сеанс_WAP}$) Загальна кількість спроб доступу до WAP-сторінок за період випробування або звітний період ($N_{спр_дост_WAP_стор}$)	
Показники, які характеризують повноту послуг (Service Integrity, SI)	Середню швидкість передавання даних WAP-сторінки ($V_{шв_WAP}$)	Об'єм WAP-сторінки ($W_{WAP_стор}$) Момент отримання останнього пакету даних контенту (завершення завантаження) ($t_{прийн_ост_пак}$) Час отримання першого пакету даних контенту (початок завантаження) ($t_{прийн_перш_пак}$)	

Послуги електронної пошти (E-Mail)			
Показники, які характеризують доступність послуги (Service Accessibility, SAc)	Відсоток неуспішних спроб з'єднання з сервером для завантаження/отримання електронної пошти ($Q_{н_з'єдн_серв_ЕП}$)	Кількість неуспішних спроб встановлення з'єднання з сервером ($N_{неусп_спр_з'єдн_серв_ЕП}$) Загальна кількість спроб встановлення з'єднання з сервером за період випробування або звітний період ($N_{спр_з'єдн_серв_ЕП}$)	
	Нормований час встановлення з'єднання з сервером для завантаження/отримання електронної пошти ($T_{н_з'єдн_серв_ЕП}$)	Момент успішного встановлення з'єднання з сервером (починається завантаження або отримання електронної пошти) ($t_{усп_з'єдн}$) Момент спроби встановлення з'єднання (абонент ініціює завантаження або отримання електронної пошти) ($t_{спр_з'єдн}$)	
	Відсоток спроб встановлення з'єднання з сервером для завантаження/отримання електронної пошти, при яких відбулось перевищення нормованого часу ($Q_{невч_спр_з'єдн_ЕП}$)	Кількість спроб встановлення з'єднання з сервером для завантаження/отримання електронної пошти, при яких відбулось перевищення нормованого часу ($N_{невч_спр_з'єдн_ЕП}$) Загальна кількість спроб встановлення з'єднання з сервером електронної пошти за період випробування або звітний період ($N_{спр_з'єдн_ЕП}$)	
Показники, які характеризують повноту послуг (Service Integrity, SI)	Тривалість сеансу завантаження/отримання електронної пошти ($T_{ПД_ЕП}$)	Момент успішного завершення завантаження або отримання даних електронної пошти ($t_{заверш_сеанс}$) Момент успішного початку сеансу (абонент розпочинає завантаження або отримання повідомлення) ($t_{поч_сеанс}$)	
	Середня швидкість передавання даних ($V_{шв_нд}$)	Об'єм переданих даних споживача ($W_{пер_дан}$) Час отримання останнього пакета з повідомленням (повного завантаження поштового повідомлення) ($T_{ПД_зав}$) Час отримання першого пакета повідомлення (початок завантаження поштового повідомлення) ($T_{ПД_поч}$)	
Послуги передавання та приймання мультимедійних повідомлень (Multimedia Message Serv, MMS)			
Показники, які характеризують доступність послуги (Service Accessibility, SAc)	Відсоток неуспішних спроб отримання повідомлень MMS ($Q_{н_отр_MMS}$)	Кількість неуспішних спроб отримання повідомлень MMS ($N_{неусп_спрр_отр_MMS}$) Загальна кількість спроб отримання повідомлень MMS за період випробування або звітний період ($N_{спр_отр_MMS}$)	
	Відсоток неуспішних спроб доставки сповіщень про нове повідомлення MMS ($Q_{н_дост_спов_MMS}$)	Кількість неуспішних спроб доставки сповіщень про нове повідомлення MMS ($N_{неусп_дост_спов_MMS}$) Загальна кількість успішно відправлених повідомлень MMS за період випробування або звітний період ($N_{усп_відпр_MMS}$)	
Показники, які характеризують повноту послуг (Service Integrity, SI)	Відсоток неуспішних спроб доставки повідомлень MMS від кінця до кінця ($Q_{н_дост_MMS_КК}$)	Кількість усіх неуспішних спроб доставки повідомлень MMS ($N_{неусп_дост_MMS}$) Загальна кількість спроб відправлення	

		повідомлень MMS за період випробування або звітний період ($N_{спр_відпр_MMS}$)	
	Нормований час отримання повідомлення MMS ($T_{н_отр_MMS}$)	Момент, коли повідомлення MMS повністю отримано з MMSC ($t_{зав_MMSC_MMS}$) Момент, коли абонент ініціює WAP-з'єднання для отримання повідомлення MMS ($t_{WAP_з'єдн}$)	
	Відсоток повідомлень MMS, отриманих з перевищенням нормованого часу ($Q_{невч_отр_mms}$)	Кількість повідомлень MMS, отриманих з перевищенням нормованого часу ($N_{невч_отр_MMS}$) Загальна кількість отриманих повідомлень MMS за період випробування ($N_{отр_MMS}$)	
	Нормований час сповіщення про нове повідомлення MMS ($T_{н_спов_MMS}$)	Момент отримання сповіщення про нове повідомлення MMS ($t_{отр_спов_MMS}$) Момент успішного відправлення повідомлення MMS ($t_{відпр_MMS}$)	
	Відсоток сповіщень про нове повідомлення MMS, отриманих з перевищенням нормованого часу ($Q_{невч_отр_спов_MMS}$)	Кількість сповіщень про нове повідомлення MMS, отриманих з перевищенням нормованого часу ($N_{невч_отр_спов_MMS}$) Загальна кількість отриманих сповіщень про нове повідомлення MMS за період випробування ($N_{отр_спов_MMS}$)	
Послуги передавання та приймання текстових повідомлень (Short Message Service, SMS)			
Показники, які характеризують доступність послуги (Service Accessibility, SAc)	Відсоток успішно переданих SMS до SMSC ($Q_{успн_перед_SMS}$)	Кількість успішно переданих SMS до SMSC ($N_{успн_перед_SMS}$) Загальна кількість відправлених повідомлень SMS за період випробування або звітний період ($N_{відправ_SMS}$)	
Показники, які характеризують повноту послуг (Service Integrity, SI)	Нормований час доставки повідомлення SMS до SMSC ($T_{н_дост_пов_SMSC}$)		
	Відсоток повідомлень SMS, що відповідають нормам за часом доставки до SMSC ($Q_{н_дост_пов_SMSC}$)	Час доставки повідомлення SMS до SMSC ($T_{дост_пов_SMSC}$) Момент, коли PAO абонента А отримує повідомлення від SMSC ($t_{SMSC_отр_пов}$) Момент, коли абонент А відправляє повідомлення SMS у SMSC ($t_{відпр_пов}$) Кількість повідомлень SMS, що відповідають нормам за часом доставки до SMSC ($N_{н_дост_пов_SMSC}$) Загальна кількість доставлених повідомлень SMS до SMSC за період випробування ($N_{дост_пов_SMSC}$)	
	Нормований час доставки повідомлення SMS від кінця до кінця ($T_{н_дост_пов_KK}$)		

	Відсоток повідомлень SMS, що відповідають нормам за часом доставки від кінця до кінця ($n_{дост_пов_KK Q}$)	Час доставки повідомлення SMS від кінця до кінця ($дост_пов_KK T$) Момент, коли PAO абонента Б отримує повідомлення SMS від PAO абонента А ($отр_пов t$) Момент, коли абонент А відправляє повідомлення SMS у SMSC ($відпр_пов t$) Кількість повідомлень SMS, що відповідають нормам за часом доставки від кінця до кінця ($Nn_{дост_пов_KK}$) Загальна кількість доставлених повідомлень SMS від кінця до кінця за період випробування ($Nдост_пов_KK$)	
	Відсоток недоставлених повідомлень SMS ($Q_{н_дост_SMS}$)	Кількість усіх неуспішних спроб доставки тестових повідомлень SMS ($N_{неусп_дост_SMS}$) Кількість тестових повідомлень SMS, прийнятих двічі ($N_{дв_отр_SMS}$) Кількість пошкоджених тестових повідомлень N SMS ($пошк_SMS$) Загальна кількість відправлених тестових повідомлень SMS ($N_{відпр_SMS}$)	
Показники, які характеризують надійність надання послуг (Services Reliability, SR)	Нормований час усунення пошкоджень МРЗЗК та відновлення доступу до послуг зі встановленими значеннями показників якості ($T_{нчуп}$)		
	Відсоток заяв про пошкодження МРЗЗК, виконаних за нормований час ($Q_{зупн}$)	Час усунення пошкоджень МРЗЗК та відновлення доступу до послуг зі встановленими значеннями показників якості ($T_{чуп}$) Кількість заяв про пошкодження МРЗЗК, виконаних за нормований час ($N_{зупн}$) Загальна кількість заяв про пошкодження МРЗЗК за період випробування або за звітний період ($N_{звз}$) Тривалість звітного періоду *) ($T_{звп}$)	
Показники, які характеризують проведення нарахувань за послуги (Charging Performance, CP)	Відсоток рахунків, на які були отримані звернення від споживачів щодо їх некоректності (неправильності) ($Q_{зкр}$)	Кількість рахунків, на які були отримані звернення від споживачів щодо їх некоректності (неправильності) ($N_{зкр}$) Загальна кількість рахунків за послуги, які були надані ОПТ за звітний період ($N_{зкрп}$) Тривалість звітного періоду ($T_{звп}$)	
	Відсоток відкритих особових рахунків абонентів попередньо оплачених послуг, на які були отримані звернення від споживачів щодо	Кількість відкритих особових рахунків абонентів попередньо оплачених послуг, на які були отримані звернення від споживачів	

	некоректності (неправильності) проведення розрахунків за надані послуги ($Q_{зпор}$)	щодо некоректності (неправильності) проведення розрахунків за надані послуги ($N_{зпор}$) Загальна кількість відкритих особових рахунків абонентів попередньо оплачених послуг кінець звітного періоду ($N_{зопп}$) Тривалість звітного періоду ($T_{звп}$)	
Показники задоволеності споживачів обслуговуванням (Satisfaction of users by service, SUS)	Відсоток звернень щодо організаційних аспектів обслуговування ($Q_{зоас}$)	Кількість звернень на організаційні аспекти обслуговування, які надійшли до ОПТ за звітний період*) ($N_{зоас}$) Кількість абонентів, зареєстрованих на початок звітного періоду ($N_{казп}$) Кількість абонентів, зареєстрованих на кінець звітного періоду ($N_{казк}$) Тривалість звітного періоду ($T_{звп}$)	
	Відсоток звернень щодо технічних аспектів обслуговування ($Q_{зтао}$)	Кількість звернень на технічні аспекти обслуговування, що поступили до ОПТ за звітний період ($N_{зтао}$) Середня кількість абонентів, зареєстрованих на початок та на кінець звітного періоду ($N_{сказ}$) Тривалість звітного періоду ($T_{звп}$)	

*) Звітним періодом є квартал або рік.

ДОДАТОК Б
РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ
АБОНЕНТІВ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ

Швидкість вхідного потоку Мб/сек	Швидкість вихідного потоку Мб/сек	Затримка	Потужність сигналу	Координати довгота	Координати широта	Швидкість завантаження відео файлу Мб/сек
1.5649452272	0.9987515608	165.0	-67	50.5107593	30.5020324	0.1180952384
1.5154385304	0.7949915536	215.0	-51	50.5107593	30.5020324	0.2403595504
1.2102874432	0.6901311248	158.0	-49	50.5107593	30.5020324	0.3423333336
0.9319664496	0.5366246312	167.0	-47	50.5107593	30.5020324	0.4182641512
0.9103322712	0.5282969032	149.0	-47	50.5107593	30.5020324	0.6347169808
0.8341153168	0.3769672984	175.0	-47	50.5107593	30.5020324	0.6673898304
0.7375991152	0.3695662216	151.0	-67	50.5107593	30.5020324	0.9509915968
0.5346521416	0.3209757664	164.0	-65	50.5107593	30.5020324	0.6489302328
0.5955926144	0.3379805664	151.0	-65	50.5107593	30.5020324	0.7645454544
0.6398464368	0.2954537064	156.0	-65	50.5107593	30.5020324	1.2715505616
0.4646030544	0.2834065464	145.0	-47	50.5107593	30.5020324	0.7331764704
0.6946253368	0.2919708032	160.0	-47	50.5107593	30.5020324	0.8006588232
0.4277388656	0.2603912376	178.0	-41	50.5107593	30.5020324	0.858046512
0.4863517536	0.2961317784	153.0	-45	50.5107593	30.5020324	0.919398844
0.4534890312	0.2777874232	146.0	-51	50.5107593	30.5020324	0.916817204
0.6485084304	0.421874176	165.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.1635268816
0.4014653488	0.4528216448	172.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.2121702128
0.4305936808	0.4301075272	245.0	-53	50.5107593	30.5020324	1.5699470896
0.4344048656	0.4723665568	150.0	-59	50.5107593	30.5020324	1.4268148152
0.3596313776	0.427899016	147.0	-47	50.5107593	30.5020324	1.586148148
0.5864242776	0.3495739568	163.0	-49	50.5107593	30.5020324	0.7741614904
0.7770762504	0.3699593048	152.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.1788333336
0.6074411544	0.3738841896	180.0	-43	50.5107593	30.5020324	0.773363636
0.4124349128	0.339962604	172.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.0992727272
0.364066624	0.3433476392	178.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.2226892656
0.8885926912	0.2972762064	168.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.2452896176
0.4072905	0.4183006536	162.0	-53	50.5107593	30.5020324	1.6214207648
0.9409550696	0.3875968992	329.0	-49	50.5107593	30.5020324	1.7996521736
0.784006272	0.395354584	145.0	-41	50.5107593	30.5020324	1.463140496

0.4298995112	0.4120100944	166.0	-41	50.5107593	30.5020324	1.8620
0.3780539672	0.6901311248	163.0	-39	50.5107593	30.5020324	1.508096
0.5227049984	0.5366246312	201.0	-43	50.5107593	30.5020324	1.6392031872
0.3142183816	0.5282969032	153.0	-41	50.5107593	30.5020324	1.6019393936
0.4388611552	0.3769672984	172.0	-47	50.5107593	30.5020324	1.7323030304
0.9378663544	0.3695662216	195.0	-47	50.5107593	30.5020324	1.7624060152
0.466553916	0.3209757664	146.0	-59	50.5107593	30.5020324	1.8486616544
0.6553616776	0.3379805664	167.0	-61	50.5107593	30.5020324	1.8776716416
0.8801848392	0.2954537064	163.0	-57	50.5107593	30.5020324	1.9559851304
0.4992822816	0.2834065464	172.0	-57	50.5107593	30.5020324	1.9912296296
0.3336252552	0.2919708032	168.0	-57	50.5107593	30.5020324	2.0762074072
0.462027144	0.2603912376	182.0	-47	50.5107593	30.5020324	2.0954139192
0.6169507208	0.2961317784	178.0	-53	50.5107593	30.5020324	2.1374358976
0.5374538128	0.3379805664	166.0	-45	50.5107593	30.5020324	2.1715036496
0.8125126952	0.2954537064	157.0	-45	50.5107593	30.5020324	2.3721890912
0.4741302672	0.2834065464	151.0	-45	50.5107593	30.5020324	2.4556218184
0.3499409472	0.2919708032	165.0	-55	50.5107593	30.5020324	2.5390545456
0.66505944	0.2603912376	172.0	-55	50.5107593	30.5020324	2.5078162544
0.599520384	0.2961317784	160.0	-55	50.5107593	30.5020324	2.5393802816
0.604047116	0.2777874232	173.0	-55	50.5107593	30.5020324	2.6201690144
0.5580357144	0.421874176	184.0	-55	50.5107593	30.5020324	2.5355704696

ДОДАТОК В

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ КЛЮЧОВИХ ПОКАЗНИКІВ СТАНУ МЕРЕЖІ

```
import pandas as pd
import numpy
import tkinter
import tkinter.filedialog as fd
import tkinter.font as f
from tkinter import ttk as ttk
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
from matplotlib.figure import Figure

def GiveData():
    dbpath = fd.askopenfilename(title='Виберіть базу даних')

    Test(dbpath)

def Test(dbpath):
    features = pd.read_csv(dbpath, sep=";")
    lng1 = features["VideoSpeed"].size
    Text = 'Проблеми відсутні'
    maxkol = 0
    global l1
    global window
    for j in features:
        if not j == "VideoSpeed" and not j == "KoorD" and not j == "KoorSh":
            summ = 0
            lng2 = 0
            kor = numpy.corrcoef(features["VideoSpeed"], features[j])[1][0]
            for i in range(lng1):
                if features["VideoSpeed"][i] > 1.5:
                    summ = summ + features[j][i]
                    lng2 = lng2 + 1
                if lng2 > 10 and lng2 > lng1 * 0.1:
                    summ = summ / lng2 * 0.96
                    koef = 1

            if 0 > kor:
                koef = -1
            if abs(kor) > 0.099:
                kol = 0
                print("-----")
                print(summ)
                print("-----")
                for i in range(features[j].size):
                    if ((features[j][i] < summ and koef == 1) or (features[j][i] > summ and koef ==
                    -1)) and \
                    features["VideoSpeed"][i] <= 1.5:
                        kol = kol + 1
                if kol >= 5 or kol >= (lng1 - lng2) * 0.05 and maxkol < kol:
                    if j == 'SpeedIn':
                        Text = 'Проблема у швидкості вхідного потоку даних'
                    if j == 'SpeedOut':
                        Text = 'Проблема у швидкості вихідного потоку даних'
                    if j == 'TimeLost':
                        Text = 'Проблема у зavelикій затримці'
                    if j == 'Power':
                        Text = 'Проблема у низькій потужності сигналу'
            maxkol = kol
```

```

window.destroy()
window = tkinter.Tk()
window.title('Internet Analyzer')
window['bg'] = 'black'
window.minsize(width=760, height=600)

im1 = tkinter.PhotoImage(file='1.gif')
im2 = tkinter.PhotoImage(file='2.gif')
im3 = tkinter.PhotoImage(file='3.gif')
im4 = tkinter.PhotoImage(file='4.gif')
im5 = tkinter.PhotoImage(file='5.gif')
im6 = tkinter.PhotoImage(file='6.gif')
im7 = tkinter.PhotoImage(file='7.gif')
im8 = tkinter.PhotoImage(file='8.gif')
im9 = tkinter.PhotoImage(file='9.gif')
im10 = tkinter.PhotoImage(file='10.gif')

b2 = tkinter.Button(window, text="Тестувати ще раз", bg='lightblue',
command=GiveData, font=f.Font(size=20, weight=f.BOLD))
b2.place(x=0, y=0, width=760, height=40)
nb = ttk.Notebook(window)
nb.place(x=0, y=40, width=760, height=560)

fr1 = tkinter.Frame(bg='white')
fr2 = tkinter.Frame(bg='black')
nb.add(fr1, text='ГРАФІКИ')
nb.add(fr2, text='СХЕМА')
l1 = tkinter.Label(fr2, image=im1)
l1.place(x=30, y=0, width=60, height=60)
l2 = tkinter.Label(fr2, image=im2)
l2.place(x=320, y=0, width=60, height=60)
l3 = tkinter.Label(fr2, image=im3)
l3.place(x=610, y=0, width=60, height=60)
l4 = tkinter.Label(fr2, image=im4)
l4.place(x=30, y=160, width=60, height=60)
l5 = tkinter.Label(fr2, image=im10)
l5.place(x=610, y=160, width=60, height=60)
if Text == 'SpeedIn' or Text == 'SpeedOut':
l2 = tkinter.Label(fr2, image=im6)
l2.place(x=320, y=0, width=60, height=60)
l3 = tkinter.Label(fr2, image=im7)
l3.place(x=610, y=0, width=60, height=60)
l4 = tkinter.Label(fr2, image=im8)
l4.place(x=30, y=160, width=60, height=60)
if Text == 'TimeLost':
l2 = tkinter.Label(fr2, image=im6)
l2.place(x=320, y=0, width=60, height=60)
l5 = tkinter.Label(fr2, image=im9)
l5.place(x=610, y=160, width=60, height=60)
if Text == 'TimeLost':
l1 = tkinter.Label(fr2, image=im5)
l1.place(x=30, y=0, width=60, height=60)
l5 = tkinter.Label(fr2, image=im9)
l5.place(x=670, y=160, width=60, height=60)
l11 = tkinter.Label(fr1, bg='lightblue', text=Text[:len(Text) - 1],
font=f.Font(size=10, weight=f.BOLD))
l11.place(x=0, y=0, width=760, height=40)
l12 = tkinter.Label(fr2, text='Антенна базової\нстанції', fg='white', bg='black')
l12.place(x=0, y=60, height=60)
l13 = tkinter.Label(fr2, text='Радіоінтерфейс базової\нстанції', fg='white',
bg='black')
l13.place(x=300, y=60, height=60)
l14 = tkinter.Label(fr2, text='Мультиплекси транспортної\нмережі',
fg='white', bg='black')

```

```

l14.place(x=560, y=60, height=60)
l15 = tkinter.Label(fr2, text='Канали транспортної \nмережі', fg='white',
bg='black')
l15.place(x=0, y=220, height=60)
l16 = tkinter.Label(fr2, text='Абонентський термінал', fg='white', bg='black')
l16.place(x=560, y=220, height=60)
f1 = Figure(figsize=(5, 5), dpi=100)
a = f1.add_subplot(111)
a.plot(features["VideoSpeed"], color='red')
a.plot(features["SpeedIn"], color='green')
a.plot(features["SpeedOut"], color='yellow')
a.plot(features["TimeLost"] / 150)
a.plot(features["Power"] / 60)
canvas = FigureCanvasTkAgg(f1, fr1)
canvas.show()
canvas.get_tk_widget().place(x=0, y=40, width=500, height=500)
f1 = Figure(figsize=(5, 5), dpi=100)
a = f1.add_subplot(111)
a.plot(features["TimeLost"])
canvas = FigureCanvasTkAgg(f1, fr1)
canvas.show()
canvas.get_tk_widget().place(x=480, y=40, width=300, height=250)
f1 = Figure(figsize=(5, 5), dpi=100)
a = f1.add_subplot(111)
a.plot(features["Power"])
canvas = FigureCanvasTkAgg(f1, fr1)
canvas.show()
canvas.get_tk_widget().place(x=480, y=290, width=300, height=250)
window.mainloop()

```

```

global window
window = tkinter.Tk()
window.title('Аналіз показників мережі')
window['bg'] = 'black'
window.size()

b2 = tkinter.Button(window, text="Розпочати", bg='lightblue', command=GiveData,
font=f.Font(size=20, weight=f.BOLD))
b2.place(x=0, y=0, width=100, height=40)
window.mainloop()

```

ДОДАТОК Г
ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ
СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ

Код частини програмного забезпечення мовою JavaScript

```
var rectangle, map, bounds, circle, ne, sw, n1, r1, i, k, ugol, radius, rad, R, dLat,
dLong, a, c, d, a1, c1, d1, S
function initMap() {
  map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), {
    center: {lat: 50.4501, lng: 30.5234},
    zoom: 11
  });
  bounds = {
    north: 50.48,
    south: 50.42,
    east: 30.60,
    west: 30.54
  };
  rectangle = new google.maps.Rectangle({
    bounds: bounds,
    editable: true,
    draggable: true,
    strokeColor: '#000000',
    fillOpacity: 0.1,
  });
  rectangle.setMap(map);
}
function icircle() {
  ne = rectangle.getBounds().getNorthEast();
  sw = rectangle.getBounds().getSouthWest();
  rad = function(x) {
    return x * Math.PI / 180;
  };
  R = 6378137;
  dLat = rad(sw.lat() - ne.lat());
  dLong = rad(ne.lng() - ne.lng());
  a = Math.sin(dLat / 2) * Math.sin(dLat / 2) + Math.cos(rad(ne.lat())) *
Math.cos(rad(sw.lat())) * Math.sin(dLong / 2) * Math.sin(dLong / 2);
  c = 2 * Math.atan2(Math.sqrt(a), Math.sqrt(1 - a));
  d = R * c;
  dLat = rad(ne.lat() - ne.lat());
  dLong = rad(sw.lng() - ne.lng());
```

```

        a1 = Math.sin(dLat / 2) * Math.sin(dLat / 2) + Math.cos(rad(ne.lat())) *
Math.cos(rad(sw.lat())) * Math.sin(dLong / 2) * Math.sin(dLong / 2);
        c1 = 2 * Math.atan2(Math.sqrt(a1), Math.sqrt(1 - a1));
        d1 = R * c1;
    S = d * d1;
    radius = Math.sqrt(S / (NeNB * Math.PI))*1.1;
    alert("Необхідний радіус дії однієї станції: " + radius);
        ugol = radius / R;
        n1 = ne.lat() - ugol*40,
r1 = sw.lng() + ugol*65, //
k = 0; //
        for (i = 0; i < NeNB; i++) { // цикл
            if (r1 > ne.lng()) { n1 = n1 - ugol*85; //
                if (k == 0) { r1 = sw.lng(); k=1 }
else { r1 = sw.lng() + ugol*65; k=0; }
            };
            if (n1 < sw.lat()) break;
        circle = new google.maps.Circle({
            strokeColor: '#FF0000',
            strokeOpacity: 0.8,
            strokeWeight: 2,
            fillColor: '#FF0000',
            fillOpacity: 0.35,
            map: map,
            draggable: true,
            center: {lat: n1, lng: r1 },
            radius: radius
        });
        r1 = r1 + ugol*160;
    }
}
function newMap() {
    ne = rectangle.getBounds().getNorthEast();
    sw = rectangle.getBounds().getSouthWest();
    zm = map.getZoom();
    mc = map.getCenter();
    map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), {
        center: mc,
        zoom: zm
    });
    bounds = {
        north: ne.lat(),
        south: sw.lat(),
        east: ne.lng(),
        west: sw.lng(),

```

```

};
rectangle = new google.maps.Rectangle({
  bounds: bounds,
  editable: true,
  draggable: true,
  strokeColor: '#000000',
  fillOpacity: 0.1,
});
rectangle.setMap(map);
} var rectangle, map, bounds, circle, ne, sw, n1, r1, i, k, ugol, radius, rad, R,
dLat, dLong, a, c, d, a1, c1, d1, S
function initMap() {
  map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), {
    center: {lat: 50.4501, lng: 30.5234},
    zoom: 11
  });
  bounds = {
    north: 50.48,
    south: 50.42,
    east: 30.60,
    west: 30.54
  };
  rectangle = new google.maps.Rectangle({
    bounds: bounds,
    editable: true,
    draggable: true,
    strokeColor: '#000000',
    fillOpacity: 0.1,
  });
  rectangle.setMap(map);
}
function icircle() {
  ne = rectangle.getBounds().getNorthEast();
  sw = rectangle.getBounds().getSouthWest();
  rad = function(x) {
    return x * Math.PI / 180;
  };
  R = 6378137;
  dLat = rad(sw.lat() - ne.lat());
  dLong = rad(ne.lng() - ne.lng());
  a = Math.sin(dLat / 2) * Math.sin(dLat / 2) + Math.cos(rad(ne.lat())) *
Math.cos(rad(sw.lat())) * Math.sin(dLong / 2) * Math.sin(dLong / 2);
  c = 2 * Math.atan2(Math.sqrt(a), Math.sqrt(1 - a));
  d = R * c;
  dLat = rad(ne.lat() - ne.lat());

```

```

    dLong = rad(sw.lng() - ne.lng());
    a1 = Math.sin(dLat / 2) * Math.sin(dLat / 2) + Math.cos(rad(ne.lat())) *
Math.cos(rad(sw.lat())) * Math.sin(dLong / 2) * Math.sin(dLong / 2);
    c1 = 2 * Math.atan2(Math.sqrt(a1), Math.sqrt(1 - a1));
    d1 = R * c1;

    S = d * d1;
    radius = Math.sqrt(S / (NeNB * Math.PI))*1.1;
    alert("Необхідний радіус дії однієї станції: " + radius);
    ugol = radius / R;
    n1 = ne.lat() - ugol*40,
    r1 = sw.lng() + ugol*65,
    k = 0; //
        for (i = 0; i < NeNB; i++) {
            if (r1 > ne.lng()) { n1 = n1 - ugol*85; //
            if (k == 0) { r1 = sw.lng(); k=1 } //
                else { r1 = sw.lng() + ugol*65; k=0; }
            };
            if (n1 < sw.lat()) break; //
        circle = new google.maps.Circle({
            strokeColor: '#FF0000'
            strokeOpacity: 0.8,
            strokeWeight: 2,
            fillColor: '#FF0000',
            fillOpacity: 0.35,
            map: map,
            draggable: true,
            center: {lat: n1, lng: r1 },
            radius: radius
        });
        r1 = r1 + ugol*160;
    }
}
function newMap() {
    ne = rectangle.getBounds().getNorthEast();
    sw = rectangle.getBounds().getSouthWest();
    zm = map.getZoom();
    mc = map.getCenter();
    map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), {
        center: mc,
        zoom: zm
    });
    bounds = {
        north: ne.lat(),
        south: sw.lat(),

```

```

    east: ne.lng(),
    west: sw.lng(),
};
rectangle = new google.maps.Rectangle({
    bounds: bounds,
    editable: true,
    draggable: true,
    strokeColor: '#000000',
    fillOpacity: 0.1,
});
rectangle.setMap(map);
}

```

Код частини програмного забезпечення мовою C++

```

//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include "Unit1.h"
#include "ShellAPI.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
inline void __fastcall SimpleOpenIt(const String& Object)
{
    ShellExecute(NULL, L"open", Object.c_str(), NULL, NULL,
SW_SHOWNORMAL);
}
float Inpower(int &a, float &b)
{
    for (int i = 0; i < 15; i++) {
        if (b < 10) break;
        else {b = b / 10; a++;}
    }
    return a;
    return b;
}
TForm1 *Form1;
//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
: TForm(Owner)

```



```

{
    Form1->WindowState=wsMaximized;
    Application->Title="Увага!";
}
//-----
void __fastcall TForm1::N1Click(TObject *Sender)
{
    String MyFile = "main.html";
    String FileName = ExtractFilePath(GetModuleName(NULL)) + MyFile;
    SimpleOpenIt(FileName);
}
//-----
void __fastcall TForm1::N4Click(TObject *Sender)
{
    exit(0);
}
//-----
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
    float L, Ptx, Gtx, Prx, Bbody, Grx, Bfid, IM, Lslow;
    if (Edit1->Text == "" || Edit2->Text == "" || Edit3->Text == "" || Edit4->Text
== "" || Edit5->Text == "" || Edit6->Text == "" || Edit7->Text == "" || Edit8->Text ==
"") ShowMessage("Заповніть всі поля!");
    else {
        Ptx = StrToFloat(Edit1->Text);
        Gtx = StrToFloat(Edit2->Text);
        Prx = StrToFloat(Edit3->Text);
        Bbody = StrToFloat(Edit4->Text);
        Grx = StrToFloat(Edit5->Text);
        Bfid = StrToFloat(Edit6->Text);
        IM = StrToFloat(Edit7->Text);
        Lslow = StrToFloat(Edit8->Text);
        L = Ptx + Gtx - Prx - Bbody + Grx - Bfid - IM - Lslow;
        Label28 -> Caption = Label10 -> Caption + ": " + FormatFloat("0.00",L) + "
дБ";
        Label28 -> Visible = True;
    }
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    int poweNB, powCom, powAhr, Nab, Ncom, Nahr;
    float delF, Beta, Cab, CeNB, Ccom, Cahr, Call, NeNB, CosteNB, CostCom,
CostAhr, CosteNBall, CostComall, CostAhrall;
}

```

```

if (Edit9->Text == "" || Edit10->Text == "" || Edit11->Text == "" ||
Edit12->Text == "" || Edit13->Text == "" || Edit14->Text == "" || Edit15->Text == ""
|| Edit16->Text == "" || Edit17->Text == "" || Edit18->Text == "" || Edit19->Text ==
"") ShowMessage("Заповніть всі поля!");

```

```

else {

```

```

    delF = StrToFloat(Edit9->Text);
    Beta = StrToFloat(Edit10->Text);
    Nab = StrToFloat(Edit11->Text);
    CeNB = StrToFloat(Edit12->Text);
    Ccom = StrToFloat(Edit13->Text);
    Cahr = StrToFloat(Edit14->Text);
    CosteNB = StrToFloat(Edit15->Text);
    CostCom = StrToFloat(Edit16->Text);
    CostAhr = StrToFloat(Edit17->Text);
    poweNB = StrToInt(Edit18->Text);
    powCom = StrToInt(Edit19->Text);
    powAhr = StrToInt(Edit20->Text);
    //-----

```

```

    Cab = delF * Beta;
    Call = Cab * Nab;
    NeNB = (Call / CeNB);
    Edit21->Text = FormatFloat("0", NeNB);
    NeNB = StrToInt(Edit21->Text);
    if (NeNB == 0) NeNB = 1;
    Ncom = Call / Ccom;
    Edit21->Text = FormatFloat("0", Ncom);
    Ncom = StrToInt(Edit21->Text);
    if (Ncom == 0) Ncom = 1;
    Nahr = Call / Cahr;
    Edit21->Text = FormatFloat("0", Nahr);
    Nahr = StrToInt(Edit21->Text);
    if (Nahr == 0) Nahr = 1;
    //-----

```

```

    Label16->Caption = FormatFloat("0.00", Cab);
    Label17->Caption = FormatFloat("0", Nab);
    Label18->Caption = FormatFloat("0.00", Call);
    //-----

```

```

    Label21->Caption = FormatFloat("0.00", CeNB);
    Label22->Caption = FormatFloat("0", NeNB);
    Label23->Caption = FormatFloat("0.00", Call);
    Inpower(poweNB, CosteNB);

```

```

    Label24->Caption = FormatFloat("0.000", CosteNB) + " * 10";
    Label42->Left = Label24->Left + Label24->Width;
    Label42->Caption = poweNB;

```

```

CosteNBall = CosteNB * NeNB;
Inpower(poweNB, CosteNBall);
Label25->Caption = FormatFloat("0.000", CosteNBall) + " * 10";
Label46->Left = Label25->Left + Label25->Width;
Label46->Caption = poweNB;
//-----
Label26->Caption = FormatFloat("0.00", Ccom);
Label27->Caption = FormatFloat("0", Ncom);
Label33->Caption = FormatFloat("0.00", Call);
Inpower(powCom, CostCom) ;
Label34->Caption = FormatFloat("0.000", CostCom) + " * 10";
Label43->Left = Label34->Left + Label34->Width;
Label43->Caption = powCom;
CostComall = CostCom * Ncom;
Inpower(powCom, CostComall);
Label35->Caption = FormatFloat("0.000", CostComall) + " * 10";
Label47->Left = Label35->Left + Label35->Width;
Label47->Caption = powCom;
//-----

Label36->Caption = FormatFloat("0.00", Cahr);
Label37->Caption = FormatFloat("0", Nahr);
Label38->Caption = FormatFloat("0.00", Call);
Inpower(powAhr, CostAhr) ;
Label39->Caption = FormatFloat("0.000", CostAhr) + " * 10";
Label44->Left = Label39->Left + Label39->Width;
Label44->Caption = powAhr;
CostAhrall = CostAhr * Nahr;
Inpower(powAhr, CostAhrall);
Label40->Caption = FormatFloat("0.000", CostAhrall) + " * 10";
Label48->Left = Label40->Left + Label40->Width;
Label48->Caption = powAhr;
//-----
Image1 -> Visible = True;
Label16 -> Visible = True;
Label17 -> Visible = True;
Label18 -> Visible = True;
Label19 -> Visible = True;
Label20 -> Visible = True;
Label21 -> Visible = True;
Label22 -> Visible = True;
Label23 -> Visible = True;
Label24 -> Visible = True;
Label25 -> Visible = True;
Label26 -> Visible = True;

```

```

Label27 -> Visible = True;
Label33 -> Visible = True;
Label34 -> Visible = True;
Label35 -> Visible = True;
Label36 -> Visible = True;
Label37 -> Visible = True;
Label38 -> Visible = True;
Label39 -> Visible = True;
Label40 -> Visible = True;
Label42 -> Visible = True;
Label43 -> Visible = True;
Label44 -> Visible = True;
Label46 -> Visible = True;
Label47 -> Visible = True;
Label48 -> Visible = True;

```

```

N1->Enabled = true;
ofstream f;
f.open("NeNB.js", ios::out);
    f<<"var NeNB = "<<NeNB<<";\n";
    f.close();

```

```

    }
}
//-----
void __fastcall TForm1::Edit1KeyPress(TObject *Sender, System::WideChar &Key)
{
    if(!((Key>='0'&&Key<='9')||Key==VK_BACK||Key==',')) Key=0;
    if (Key==',') { if (((TEdit*)Sender)->Text.Pos(',')!=0) Key=0;
                    else Key=',';}
}
//-----
void __fastcall TForm1::Edit11KeyPress(TObject *Sender, System::WideChar
&Key)
{
if(!((Key>='0'&&Key<='9')||Key==VK_BACK)) Key=0;
}
//-----
void __fastcall TForm1::N2Click(TObject *Sender)
{
    String MyFile = "help.pdf";
    String FileName = ExtractFilePath(GetModuleName(NULL)) + MyFile;
    SimpleOpenIt(FileName);
}
//-----

```

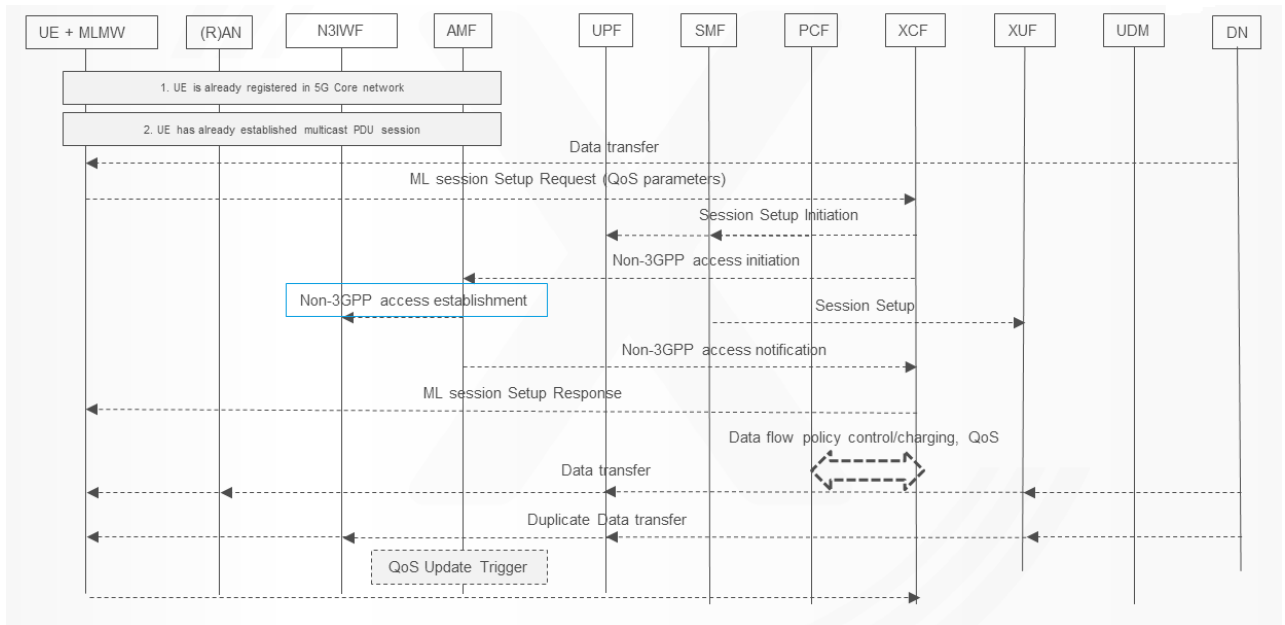
Код частини програмного забезпечення мовою HTML

```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <meta name="viewport" content="initial-scale=1.0, user-scalable=no">
    <meta charset="utf-8">
    <title>Карта ефективності</title>
    <style>

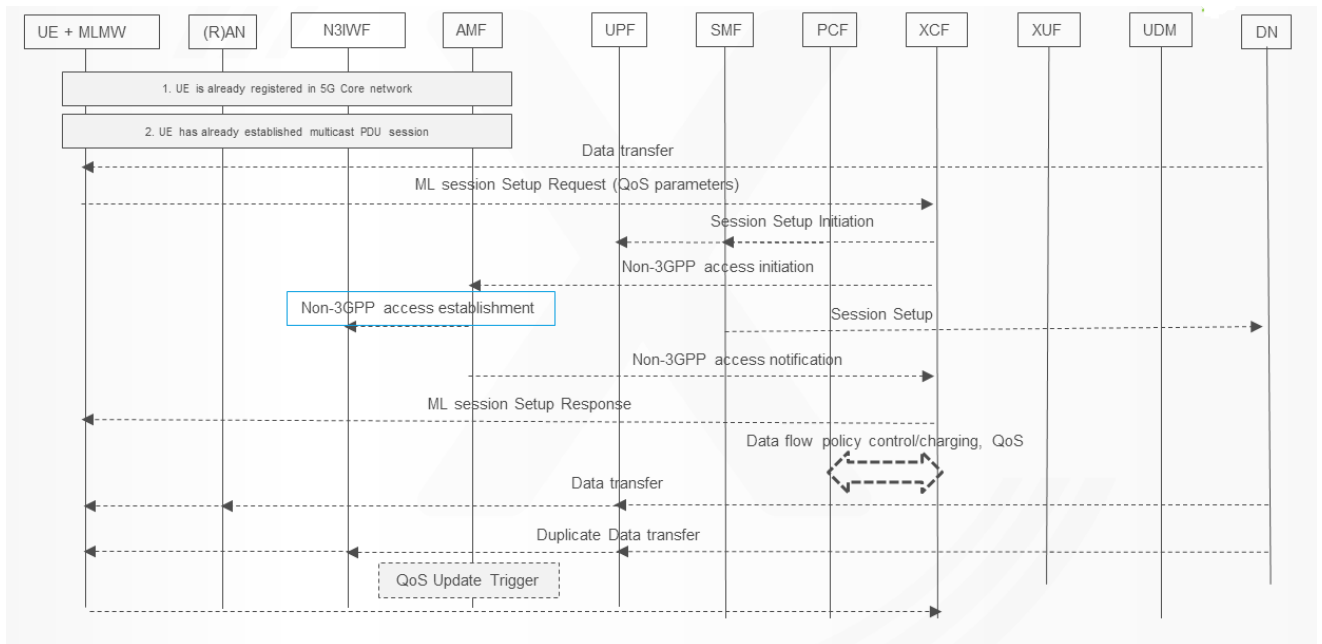
      #map {
        height: 95%;
      }
      html, body {
        height: 100%;
        margin: 0;
        padding: 0;
      }
    </style>
  </head>
  <body>
    <div>
      <form align="center">
        <input type="button" id="btnrad" value="Показати" onclick="icircle()">
        <input type="button" id="btnres" value="Очистити" onclick="newMap()">
      </form>
    </div>
    <div id="map"></div>
    <script src="NeNB.js"></script> <!-- підключення файлу зі змінною -->
    <script src="main.js"></script> <!-- підключення головного файлу -->
    <script async defer src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=AIzaSy
CPZJBgszOXXIVjUAErTfGhd_6ATf6rzo0&language=uk&callback=initMap">
    </script>
  </body>
</html>
```

ДОДАТОК Д

ПРОЦЕДУРИ ВСТАНОВЛЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ В МЕРЕЖІ 5G

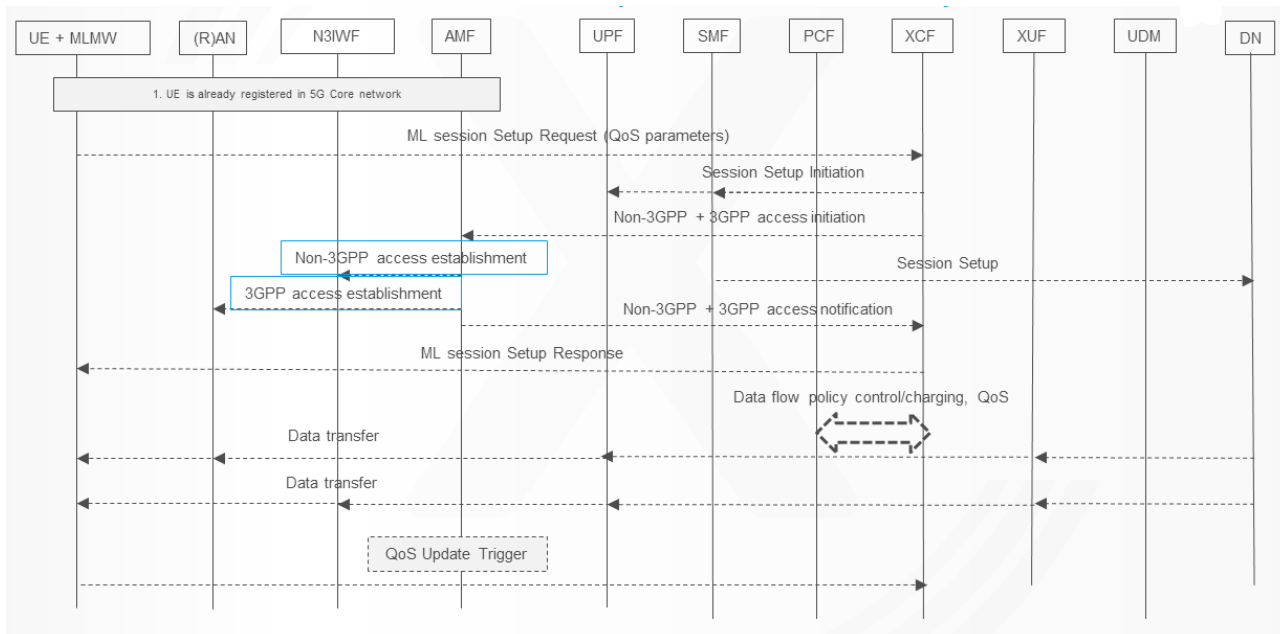


(а)

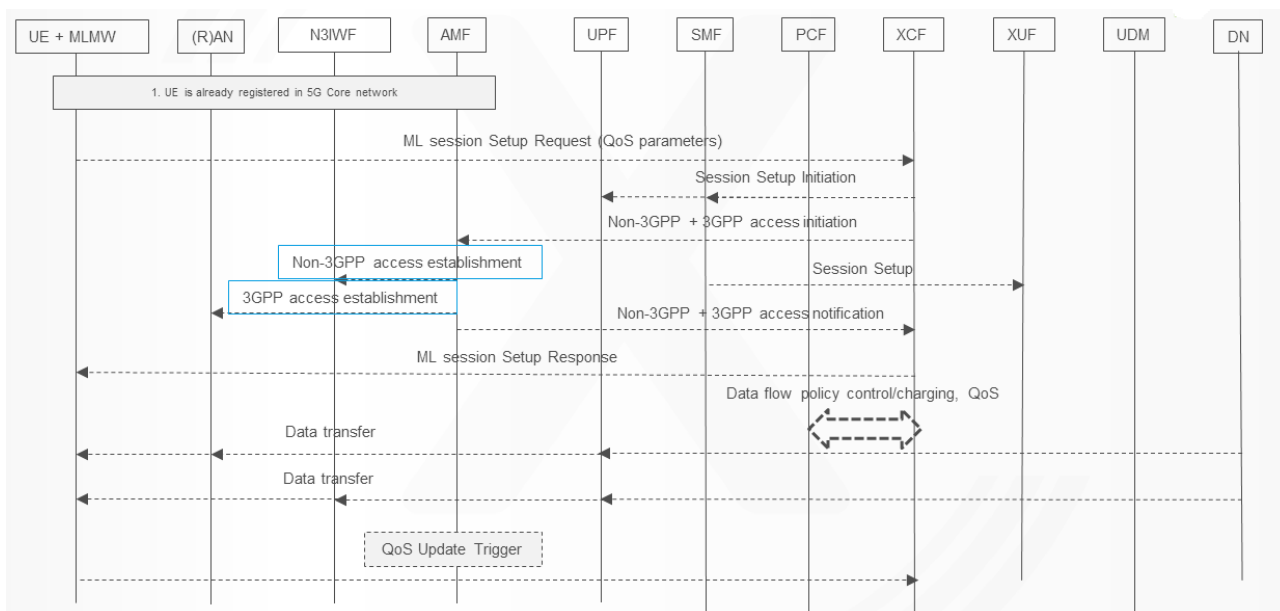


(б)

Рис. Д.1. Процедури встановлення багатоканального з'єднання в мережі 5G для забезпечення безшовного переходу між зонами multicast та unicast (а – для Альтернативи 1 в рамках проекту 5G-Xcast; б – для Альтернативи 2 в рамках проекту 5G-Xcast)



(a)



(б)

Рис. Д.2. Процедури встановлення багатоканального з'єднання в мережі 5G для підвищення пропускної здатності (а – для Альтернативи 1 в рамках проекту 5G-Xcast; б – для Альтернативи 2 в рамках проекту 5G-Xcast)

ДОДАТОК Е
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО
ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати дисертації впроваджено у діяльність:

- ТОВ «Українські новітні технології» (акт від 24.07.2017);
- ТОВ «М.М.Д Смарт Україна» (акт від 11.12.2018),
- ДержНДІ спеціального зв'язку та захисту інформації (акт від 07.02.2017);
- Bundleslab KFT (акт від 03.12.2018).

Результати дисертації також використовуються у навчальному процесі:

- Центру перепідготовки та підвищення кваліфікації при Київській обласній державній адміністрації (акт від 23.08.2017);
- Національного авіаційного університету (акт від 11.12.2018);
- Державного закладу «Київський коледж зв'язку» (акт від 06.12.2017);
- Університету у Бельсько-Бялій (акт від 18.05.2018) для підвищення ефективності підготовки фахівців з телекомунікацій.

Надалі наведено відповідні акти впровадження.



ТОВ «УКРАЇНСЬКІ НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»
Україна, 01001, м. Київ,
вул. Трьохсвятительська, 5/1-А
поштова адреса:
Україна, 03056 м. Київ, вул. Борщагівська 145, офіс 189
тел. +380 44 496 59 79
www.freshtel.ua

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Одарченко Романа Сергійовича «Методологія підвищення ефективності стільникових мереж зв'язку» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у діяльність ТОВ "Українські новітні технології"

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Одарченко Романа Сергійовича «Методологія підвищення ефективності стільникових мереж зв'язку» впроваджено та використано у діяльності ТОВ "Українські новітні технології".

Під час написання дисертації Одарченко Р.С. розробив навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіо покриття базових станцій мережі LTE.

Програмний засіб, призначений для попередньої оцінки зон радіо покриття базових станцій стільникових мереж зв'язку, може бути використаним під час навчання інженерів, що працюють в компанії, а також для оцінки кількості та місцезнаходження базових станцій на певній місцевості, яка задається із використанням додатку Google Maps у веб-браузерному додатку.

Це дає змогу надати доступ до ресурсу всім зацікавленим користувачам. Такий підхід має свої переваги:

- немає необхідності завантажувати і встановлювати додаткове програмне забезпечення;
- програма у вільному доступі, незалежно від місцезнаходження користувача;
- при оновленні програми зміни вносяться автоматично і доступні усім користувачам;
- конфлікту версій немає.

Серед можливостей програми слід відмітити:

можливість вибору різних моделей розповсюдження радіохвиль для прогнозування величини затухань радіосигналу на трасі розповсюдження;

- можливість врахування кількості та характеру перешкод на шляху розповсюдження радіосигналу;
- урахування температури навколишнього середовища, та наявності атмосферних опадів.

У діяльності нашої компанії даний засіб використано для попередньої оцінки зон радіо покриття стільникових мереж WiMAX.

Отже, результати отримані Одарченко Р.С. під час написання дисертаційної роботи, дозволили зменшити витрати часу, трудових та грошових ресурсів для оцінки зон радіо покриття стільникових мереж WiMAX.

Директор



С.М. Веретюк

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Одарченко Романа Сергійовича «Методологія підвищення ефективності функціонування
стільникових мереж зв'язку» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у
діяльність ТОВ «М.М.Д Смарт Україна»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Одарченка Романа Сергійовича «Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку» впроваджено та використано у діяльності ТОВ «М.М.Д Смарт Україна».

Під час підготовки дисертації Одарченко Р.С. розробив метод вибору та оцінки ключових показників якості надання послуг та продуктивності мережі. Даний метод може бути покладений в основу розробки системи моніторингу та оптимізації параметрів мережі в залежності від необхідного рівня якості надання послуг.

Така система має свої переваги та надає змогу:

- вибирати оптимальні показники ефективності та якості обслуговування абонентів мережі стільникового оператора;
- проводити оптимізацію параметрів мережі оператора зв'язку;
- проводити більш ефективне керування мережею оператора зв'язку;
- більш гнучко запроваджувати нові сервіси для використання в мережі оператора зв'язку.

Отже, результати отримані Одарченко Р.С. під час написання дисертаційної роботи, дозволили зменшити витрати часу, трудових та грошових ресурсів для моніторингу та оптимізації ключових показників продуктивності мережі оператора зв'язку.

Директор підприємства



О.М. Созонова

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Т.в.о. начальника Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації

С.Є. Гнатюк

“07” лютого 2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів

доцента кафедри телекомунікаційних систем

Національного авіаційного університету

ОДАРЧЕНКА Романа Сергійовича

Комісія у складі голови комісії Юдіна Олексія Юрійовича та членів комісії у складі: Гончара Сергія Феодосійовича та Паламарчука Андрія Андрійовича встановила, що наступні результати досліджень Одарченка Р.С. реалізовані в Державному науково-дослідному інституті спеціального зв'язку та захисту інформації:

1. Методику вибору сучасних технічних рішень та розробки специфікацій у галузі уніфікованих комунікацій, побудованих за технологією IMS/A-IMS для побудови загальнодержавної мережі;

2. Специфікації мультисервісної платформи IMS для урядового зв'язку.

Вказані результати було використано в ході виконання науково-дослідної роботи, шифр “Платформа”, № держреєстрації 0116U000072т. Впровадження даних результатів дозволило забезпечити підвищення ефективності функціонування систем урядового зв'язку в Україні.

Роботи виконувались на підставі договору про наукове співробітництво між Державним науково-дослідним інститутом спеціального зв'язку та захисту інформації №7/16СД від 20.07.2016 року.

Даний акт не є підставою для проведення взаємних фінансових взаєморозрахунків.

Голова комісії
начальник науково-дослідного центру
ДержНДІ Спецзв'язку
“7” лютого 2017 р.

Юдін О.Ю.

Члени комісії:
заступник начальника науково-дослідного центру
ДержНДІ Спецзв'язку,
к.т.н.
“7” лютого 2017 р.

Гончар С.Ф.

Головний науковий співробітник науково-дослідного центру
ДержНДІ Спецзв'язку,
к.т.н.
“7” лютого 2017 р.

Паламарчук А.А.



ACT
of implementation of the results of dissertation work
"Methodology of improving the efficiency of cellular communication networks" (Author: Roman Odarchenko) for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the activity of KFT Bundleslab (Budapest, Hungary)

The act confirms that the results of the dissertation work "*Methodology of improving the efficiency of cellular communication networks*" (Author: Roman Odarchenko) was implemented and used in the activity of KFT Bundleslab (Budapest, Hungary).

Working on the dissertation Roman Odarchenko participated in the improvement of the 5G network architecture to enable multilink data transmission. He proposed new functionality for the NFs, created new procedures and worked on the development of multilink demo for EUCNC 2019.

In the 5G-Xcast project (Horizon 2020, grant number 761498) Roman Odarchenko proposed new multilink solutions for 5G, that bring the next benefits:

1. Overall bandwidth: The possibility to deliver broadband content that would be impossible to deliver over a single link.
2. Reliability and availability of the service: In any single layer-2 link, especially in a wireless environment, the fluctuation in bandwidth, latency or error rate can be dramatic. Using multiple links as a virtual single broadband connection could mitigate these fluctuations. Seamless transition between single-L2-link and multilink could be achieved in a reliable way due to the use of simultaneous multiple networks in a dynamic way.
3. Mobility support: the first two feature benefits also imply that the mobility (including at high speed) is supported in an improved manner. In this case, mobility means the seamless transition between coverage areas of different networks or technologies, with continuous QoS and QoE. For instance, the end user can enjoy a seamless viewing experience when moving from the office to the home using the same mobile device.

Multilink solution will help ensure Europe's leadership. Public demand for immersive media expands to 4k/8k Ultra-High-Definition Television (UHDTV) including HDR (High-Dynamic Range), HFR (High Frame Rates) and wide colour space, object-based content, Virtual/Augmented/Mixed Reality (VR/AR/MR), 360° visual media and Next Generation Audio. 5G is expected to provide the main means to deliver these new audio-visual media including their consumer interactivity. That's why using of multiple links in parallel is very important.

Consequently, the results were obtained by Roman Odarnchenko during the writing of the dissertation, allowed to provide better QoE and reliability for the 5G networks subscribers.

Director

Noam Amram

BundlesLab Kft.
Arhivszám: 23971427-1-43
1117 Budapest, Vali utca 4. 4./2.



**ЗАКЛАД ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ
„ЦЕНТР ПЕРЕПІДГОТОВКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ
ПРАЦІВНИКІВ ОРГАНІВ ДЕРЖАВНОЇ ВЛАДИ,
ОРГАНІВ МІСЦЕВОГО САМОВРЯДУВАННЯ,
ДЕРЖАВНИХ ПІДПРИЄМСТВ, УСТАНОВ І ОРГАНІЗАЦІЙ
ПРИ КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСНІЙ ДЕРЖАВНІЙ АДМІНІСТРАЦІЇ”**

01196, м.Київ-196, пл. Лесі Українки, 1, тел. 286-85-63, тел./факс 286-81-59, centr@koda.gov.ua

Від 23.08.2017 № 43-11/192

Акт впровадження

Результати дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук к.т.н., доцента кафедри телекомунікаційних систем навчально-наукового інституту Аеронавігації Національного авіаційного університету Одарченка Романа Сергійовича були впроваджені і використовуються у діяльності закладу післядипломної освіти «Центр перепідготовки та підвищення кваліфікації працівників органів державної влади, органів місцевого самоврядування, державних підприємств, установ і організацій при Київській обласній державній адміністрації» (далі – Центр) під час роботи літньої школи «Кібербезпека. Основи роботи інформаційно-комунікаційних систем, протидія, попередження та уникнення глобальних ризиків» (14-18 серпня 2017 року), а також під час викладання дисципліни «Електронне урядування та електронна безпека у сфері державної служби».

Директор Центру



С.Ю. Лукін

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор Національного авіаційного університету з наукової роботи

В.П. Харченко
2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора технічних наук Одарченка Р.С. у навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри телекомунікаційних систем навчально-наукового інституту Аеронавігації, електроніки та телекомунікацій д.т.н., проф. Г.Ф. Конахович, директор навчально-наукового інституту Аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету д.т.н., проф. І.О. Мачалін

склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Одарченка Романа Сергійовича «Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку»

використовуються у навчальному процесі на кафедрі телекомунікаційних систем навчально-наукового інституту Аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Методика вибору оптимальної технології транспортної мережі	У навчальний процес для проведення курсового проектування з дисциплін «Авіаційні телекомунікаційні системи та мережі». Впроваджена методика дозволила підвищити якість підготовки студентів, що навчаються за напрямом 6.050903 «Телекомунікації» шляхом набуття ними знань та вмінь із визначення оптимальної технології для побудови транспортних мереж зв'язку в залежності від вимог, які до них висуваються
Методика вибору сучасних технічних рішень у галузі уніфікованих комунікацій, побудованих за технологією IMS/A-IMS	У навчальний процес як методичні матеріали для проведення лабораторних занять та курсового проектування з дисципліни «Інформаційні та телекомунікаційні мережі». Впроваджена методика дозволила підвищити якість підготовки студентів, що навчаються за напрямом 6.050903 «Телекомунікації» шляхом набуття ними знань та вмінь в області сучасних уніфікованих комунікацій, які можуть бути використані для побудови сучасних інформаційно-комунікаційних мереж загальнодержавного призначення.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем, д.т.н., проф.

Г.Ф. Конахович

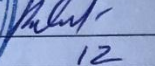
Директор навчально-наукового інституту аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, д.т.н., проф.

І.О. Мачалін



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з навчальної роботи Державного закладу «Київський коледж зв'язку»

 В.С. Шматко
12 2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

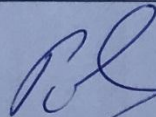
результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора технічних наук Одарченко Р.С. у навчальний процес Державного закладу «Київський коледж зв'язку»

Ми, що нижче підписалися, *к.т.н.*, заступник директора з навчально-виробничої роботи Коновалов О.Ю. та голова циклової комісії «Мобільних комунікацій та телебачення» Павелко П.О.

склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Одарченко Романа Сергійовича «Методологія підвищення ефективності стільникових мереж зв'язку» використовуються у навчальному процесі в циклових комісіях «Мобільних комунікацій та телебачення» та «Телекомунікаційних систем і мереж» у Державному закладі «Київський коледж зв'язку».

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Метод оцінки ефективності програмно-конфігурованих мереж SDN	У навчальний процес для проведення лабораторних та практичних занять з дисциплін «Системи мобільного зв'язку» та «Телекомунікаційні системи передачі». Впроваджений метод дозволив підвищити якість підготовки студентів, що навчаються за спеціальністю 6.050903 «Телекомунікації» шляхом набуття ними знань та вмінь із оцінки ефективності програмно-конфігурованих мереж у спеціальному програмному забезпеченні для моделювання роботи мереж SDN.
Навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіо покриття базових станцій мережі LTE	У навчальний процес, як методичні матеріали для посібника з курсового проектування дисципліни «Системи мобільного зв'язку». Завдяки своїй наочності, можливості оперативного проведення модифікацій програмних модулів та інтеграції з апаратними засобами ПК та засобами вимірювальної техніки, впроваджене програмне забезпечення дозволило підвищити ефективність засвоєння студентами матеріалу та проведенні розрахунків в курсовому проекті.

Заступник директора з наавчально-виробничої роботи, к.т.н.



Коновалов О.Ю.

Голова циклової комісії «Мобільних комунікацій та телебачення»



Павелко П.О.



University
of Bielsko-Biala

UNIVERSITY OF BIELSKO-BIALA
DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE
AND AUTOMATICS
2 Willowa St, Bielsko-Biala, 43-309 Poland
tel. 33 827 92 64

Department of Computer Science and Automatics

від „18” ^{АКТ} 05 20 18 року

про впровадження результатів дисертаційної роботи
канд. техн. наук Романа Одарченка
в галузі технічних наук за групою спеціальностей
“Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація”

Основні результати наукового дослідження канд. техн. наук Романа Одарченка на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук апробовані та впроваджені у наукових роботах кафедри інформатики та автоматики, а також використані у навчальному процесі при викладанні дисциплін «Безпека інформаційних технологій», «Безпека в автоматичі та інформаційно-вимірjuвальних системах» і «Безпроводові мережі» для студентів напрямів “Інформатика” та “Автоматика і робототехніка”.

Використання матеріалів дисертаційної роботи канд. техн. наук Романа Одарченка у викладенні вказаних дисциплін сприяє підвищенню якості підготовки фахівців.

Комісія в складі:

завідувач кафедри інформатики та автоматики
проф., докт. габ. інж.

KIEROWNIK

Katedry Informatyki i Automatyki

Миколай Карпінські

Mikolaj Karpinski
prof. dr hab. inż. Mikolaj Karpinski

професор кафедри інформатики та автоматики
проф., докт. габ.

Vasyl Marcenjuk

Василь Марценюк

AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA
KATEDRA INFORMATYKI I AUTOMATYKI
43-309 Bielsko-Biala, ul. Willowa 2
tel. 33 827 92 64

43-309 Bielsko-Biala, ul. Willowa 2
phone: (33) 8279 233, fax: (33) 8279 233
Regon: 072728961, NIP: 547-19-43-784
mkarpinski@ath.bielsko.pl, www.ath.bielsko.pl