МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІОННИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОЛІГЕНЬКО ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.396.43

ДИСЕРТАЦІЯ

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СТІЛЬНИКОВОГО ОПЕРАТОРА

Спеціальність 05.13.06 - Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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

_____ О.О. Полігенько

Науковий консультант:
Одарченко Роман Сергійович, доктор технічних наук, доцент

Черкаси 2021

АНОТАЦІЯ

Полігенько О.О. Інформаційна технологія підвищення ефективності роботи базових станцій стільникового оператора. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». –Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Одним із головних напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових поколінь стільникових мереж зв'язку, зокрема, 5G. Вони найбільш придатні для забезпечення високошвидкісного доступу до інформаційних ресурсів, що є дуже важливим для розширення ринку телекомунікаційних послуг. Необхідність забезпечення повсюдного високошвидкісного доступу до Інтернету, корпоративних та інших мереж визначає загальносвітові тенденції до збільшення на цьому ринку частки мереж широкосмугового безпроводового доступу. Поширенню таких мереж сприяють відносно невеликі часові і фінансові витрати на розгортання їх інфраструктури у порівнянні з проводовими мережами та можливість забезпечення широкосмугового доступу в тих регіонах, де застосування проводових мереж доступу є економічно недоцільним або неможливим. Тому впровадження новітніх високоефективних стільникових мереж нового покоління можна вважати стратегічним напрямком повсюдного забезпечення населення доступними засобами отримання, передачі та поширення інформації. Крім того ж ці вище розглянуті тенденції характерні і для концепції IoT.

Постійно зростаючі потреби у високошвидкісному доступі до інформаційних ресурсів стимулюють появу і розвиток нових стільникових мереж. Серед них своїми широкими можливостями яскраво виділяються мережі LTE. Підвищення ефективності функціонування цих мереж із урахуванням нових технологій визначає коло задач, які потребують першочергового розв'язання. До найважливіших із цих задач, які визначають інноваційну новизну сучасних

телекомунікаційних безпроводових систем, належить задачі оцінки та підвищення ефективності їх функціонування. Існуючі методи підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку вже значною мірою не відповідають потребам сучасності, а тому потребують корегування та доповнень. Тому для теоретичного обґрунтування і створення наукових основ побудови новітніх стільникових мереж поряд із удосконаленням існуючих необхідна розробка нових ефективних методів підвищення ефективності їх функціонування. При цьому зазначені стільникові мережі повинні забезпечити ті сервіси, які не в змозі надати технології мобільного зв'язку четвертого покоління та безпроводових локальних мереж сімейства стандартів IEEE 802.11.

Слід констатувати, що ключовим елементом будь-якої стільникової мережі є підсистема базових станцій. З неї починається передача даних. Тому дуже важливою і актуальною задачею є саме підвищення ефективності підсистеми базових станцій.

Проблемам підвищення ефективності підсистеми базових станцій операторів стільникового зв'язку присвячена велика кількість наукових робіт. Серед яких необхідно виділити роботи М.М. Климаша, В. М. Вишневського , С. Л. Портного, І. В. Шахновича, В.О. Тихвинського, В.Ф. Єрохіна та інші.

Не дивлячись на велику кількість публікацій за даною тематикою, аналіз науково-технічних джерел свідчить про те, що залишається ряд невирішених завдань, пов'язаних із підвищенням ефективності використання базових станцій, їх енерго- та економічної ефективності.

Для досягнення поставлених цілей в дисертаційній роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів (для аналізу методів передавання інформації у широкосмугових радіосистемах); методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль (для дослідження процесу затухання електромагнітного поля в залежності від частоти та відстані в реальних умовах експлуатації стільникових мереж); методи комп'ютерного моделювання (для перевірки адекватності розроблених моделей та методів); методи прямого синтезу (для розробки структурних схем пристроїв та систем; натурного експерименту

(для перевірки адекватності розроблених методів підвищення ефективності підсистеми базових станцій).

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 підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку за рахунок урахування впливу додаткових параметрів на процес розповсюдження радіохвиль, побудови функціонально-стійкої топології зв'язку між базовими станціями та порівняння варіантів побудови по вартості. Даний метод надав змогу більш точно визначати радіус зон обслуговування базових станцій (до 9-10%) та обирати найбільш оптимальний варіант по критерію вартості та функціональної стійкості (до 99%). Далі було удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій за рахунок використання багатоканальної передачі даних, додаткового радіоінтерфейсу не-3GPP стандарту, протоколів MPQUIC, MPTCP та MLPPP та динамічного зваженого балансування навантаження. Даний метод надав змогу вдвічі збільшити кількість активних абонентів в мережі та на 15 % зменшити сукупне енергоспоживання. Також було вперше розроблено метод підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, який на відміну від відомих, полягає в послідовному використанні процедур розвантаження радіоінтерфейсу базових, альтернативних джерел відновлюваної енергії, адаптивного енергоспоживання, що дозволяє зменшити витрати енергії, адаптувати випромінювану потужність до потреб абонентів та підвищити економічну ефективність підсистеми базових станцій. На основі використання всіх вище окреслених методів було вперше розроблено

інформаційну технологію підвищення ефективності роботи підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, яка на відміну від відомих, за рахунок використання удосконаленого методу планування підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій та методу підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку дозволяє зменшити енергетичні витрати, витрати на побудову та експлуатацію підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, а отже підвищити технічну, енергетичну та економічну ефективність підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку. Для імплементації розробленої інформаційної технології до інфраструктури сучасних стільникових мереж було розроблено відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення для планування більш ефективної архітектури підсистеми базових станцій та підвищення її ефективності. Для гарантування захищеності даного програмного продукту було удосконалено методику захисту програмного забезпечення мобільного оператора на основі техніки обфускації.

Згідно з експериментальними результатами розроблений обфускатор StiK на 10% швидший, а також в 1,37 рази більше захищений, ніж аналоги. Це допомагає підприємствам галузі телекомунікацій забезпечити захист даних від різних типів атак.

Матеріали дисертаційної роботи упроваджено у діяльність Bundleslab KFT (Угорщина), Державного науково-дослідного інституту спеціального зв’язку та захисту інформації, навчальний процес Національного авіаційного університету.

Теоретичні результати, отримані в ході дисертаційного дослідження, відкривають можливість виявити та запропонувати нові практичні шляхи підвищення ефективності підсистем базових станцій стільникових мереж в Україні. При цьому отримані результати дозволяють: більш точно оцінювати максимально допустиму дальність радіозв’язку; більш ефективно планувати розміщення базових станцій; впроваджувати нові алгоритми розвантаження стільникових мереж зв’язку, 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.

ANNOTATION

Polihenko O.O. Information technology to increase the efficiency of the base station subsystem of the cellular operator. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 05.13.06 "Information technologies". - National Aviation University, Kyiv, 2019.

One of the main directions of development of modern telecommunications is the improvement of existing ones and creation of new generations of cellular communication networks, in particular, 5G. They are best suited to provide high-speed access to information resources, which is very important for expanding the market of telecommunications services. Necessity of providing ubiquitous high-speed access to the Internet, corporate and other networks determines the global trends in increasing the share of broadband wireless access networks in this market. The proliferation of such networks is facilitated by the relatively low time and financial costs of deploying their infrastructure compared to wired networks and the ability to provide broadband access in regions where the use of wired access networks is economically impractical or impossible. Therefore, the introduction of the latest high-performance cellular networks of the new generation can be considered a strategic direction of providing the population with affordable means of receiving, transmitting and disseminating information. In addition, these trends discussed above are common to the concept of IoT.

The ever-increasing need for high-speed access to information resources stimulates the emergence and development of new cellular networks. Among them, LTE

networks stand out for their wide capabilities. Improving the efficiency of these networks as well as taking into account new technologies, determines the range of tasks which need to be addressed as a matter of priority. Some of the most important of these tasks, which determine the innovative novelty of modern telecommunication wireless systems, are the tasks of evaluating and improving the efficiency of those systems' operations**.** Existing methods of improving the efficiency of cellular communication networks no longer meet the needs of today, and therefore need to be adjusted and supplemented. Thus, for the theoretical substantiation and creation of scientific bases of construction of the newest cellular networks, along with improvement of existing ones, there should be development of new effective methods of their functioning efficiency increase. In this case, these cellular networks must provide those services which are unable to provide fourth-generation mobile technology and wireless local area networks of the IEEE 802.11 standards.

It should be noted that a key element of any cellular network is the base station subsystem. Data transfer begins with it. Therefore, a very important and urgent task is to increase the efficiency of the base station subsystem.

A large number of scientific works are devoted to the problems of improving the efficiency of the base station subsystem of cellular operators. Among which it is necessary to highlight the work of M.M. Klimash, V.M. Vishnevsky, S.L. Portny, I.V. Shakhnovich, V.O. Tikhvinsky, V.F. Erokhin and others.

Despite the large number of publications on this topic, the analysis of scientific and technical sources shows that there are a number of unresolved issues related to improving the efficiency of base stations as well as their energy and economic efficiency.

To achieve the dissertation goals the following methods have been used: methods of information theory and signal transmission (for the analysis of methods of information transmission in broadband radio systems); methods of the theory of propagation of electromagnetic waves (for research of process of attenuation of an electromagnetic field depending on frequency and distance in real conditions of operation of cellular networks); computer modeling methods (to check the adequacy of the developed models and methods); methods of direct synthesis (for the development of structural diagrams of devices and

systems; full-scale experiment) (to verify the adequacy of the developed methods to improve the efficiency of the base station subsystem).

Analysis of the quality of customer service in the implemented projects of LTE networks in the world and 4G cellular networks in Ukraine revealed that the stated requirements for the fourth generation networks are not achieved in any of the implemented networks, and the actual quality of customer service (target efficiency) is quite low. indicating the low efficiency of existing methods of planning of radio networks, transport subsystems, management methods and cybersecurity. Therefore, numerous scientific results have been obtained in the work aimed at improving the efficiency of cellular communication networks. The method of planning of a base station subsystems of the cellular communication operator is improved by taking into account the influence of additional parameters on the process of radio wave propagation, of construction of functionally stable communication topology between base stations and comparison of construction options by cost. This method made it possible to determine the radius of service areas of base stations more accurately (up to 9-10%) and choose the most optimal option on the basis of cost and functional stability (up to 99%). Thereafter, the method of unloading the radio interface of the base station subsystem was improved through the use of multi-channel data transmission, additional non-3GPP standard radio interface, MPQUIC, MPTCP and MLPPP protocols and dynamic weighted load balancing. This method made it possible to double the number of active subscribers in the network and reduce the total energy consumption by 15%. Also, for the first time a method was developed to increase the energy efficiency of the base station subsystem of the cellular operator, which, unlike the known common ones, consists in sequential use of unloading procedures for the radio interface of basic, alternative renewable energy sources, adaptive energy consumption which allows to reduce energy consumption, adapt the radiated power to the needs of subscribers and increase the economic efficiency of the base station subsystem. Based on the use of all the above methods, originally developed information technology which improves the efficiency of the base station subsystem of the cellular operator, which, in contrast to the known ones, due to using an improved method of planning the base station subsystem of the cellular operator as well

as an improved method of unloading stations and the method of increasing the energy efficiency of the subsystem of base stations of the cellular operator allows to reduce energy costs, costs of construction and operation of base stations subsystem of the cellular operator, and thus increase technical, energy and economic efficiency of base stations subsystem of the cellular operator. In order to implement the developed information technology to the infrastructure of modern cellular networks, appropriate algorithmic and software solutions were developed to plan a more efficient architecture of the base station subsystem and increase its efficiency. To ensure the security of this software product, the method of mobile operator software protection based on obfuscation technique was improved as well.

According to experimental results, the developed StiK obfuscator is 10% faster and 1.37 times more protected than analogues. This helps telecommunications companies to protect data from different types of attacks.

The materials of the dissertation were introduced into the activities of Bundleslab KFT (Hungary), the State Research Institute of Special Communications and Information Protection and into the educational process of the National Aviation University.

Theoretical results obtained during the dissertation research reveals the possibility to identify and propose new practical ways to increase the efficiency of base stations subsystems of cellular networks in Ukraine. The obtained results allow: to more accurately estimate the maximum allowable range of radio communication; to more effectively plan the placement of base stations; to introduce new algorithms for unloading cellular communication networks, to use developed hardware and software for data transmission systems during planning of LTE and 5G wireless networks as well as in the educational process.

Keywords: cellular network, base station subsystem, planning, transport network, LTE, efficiency, load balancing, bandwidth, backup, security.

Список публікацій здобувача

1. Одарченко Р.С., Полігенько О.О., Дика Н.В., Поліщук В.В. Дослідження основних недоліків базових станцій різних поколінь стільникового зв'язку // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. –№3. – С.81-89.

2. Хассан Мохамед Мухи-Алдин. Модель оцінки підвищення енергоефективності підсистем базових станцій оператора стільникового зв'язку. Одарченко Р.С., Мухі- Алдін Хассан Мохамед, О.О. Полігенько, Ю. І. Хлапонін. Вісник інженерної академії, 2019. № 3. С. 72-74.

3. Oleh Polihenko, Roman Odarchenko, Sergiy Gnatyuk, "Enterprise information security management system based on the modern obfuscation technique for mobile network operators", European Ciiperation, Vol.3 No.47 (2020). https://european-cooperation.eu/index.php/EC/article/view/88

4. Arturo Arakelian, Oleh Polihenko "Improvement of Implementation of Merkle Crypto System", Scientific and practical security journal (SPCSJ), pp.40-44, https://journal.scsa.ge/wp-content/uploads/2019/10/6-331.pdf

5. Полігенько О.О., Одарченко Р.С., Потапов В.Г. Аналіз алгоритмів множинного доступу до каналів супутникового зв'язку // Проблеми інформатизації та управління.– К.: НАУ, 2013.– Вип.1 (41).– С.75-80.

6. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Полігенько О.О. Експериментальні дослідження пропускної здатності мереж стандарту IEEE 802.11n //Наукоємні технології. – 2013. – № 4 (20). – С.377-383.

7. О.О. Полигенько, Р.С. Одарченко, Н.В. Дикая, О.Ю. Скульская Исследование причин возникновения аварийных ситуаций операторов сотовой связи в Украине // Современные средства связи: международная научно-техническая конференция, 18-19 октября 2018 г.: тезы доп. – МинскБ Республика Беларусь., 2018. – С. 23 – 24.

8. Traffic offload improved method for 4G/5G mobile network operator / R. Odarchenko, A. Abakumova, O. Polihenko, S. Gnatyuk. Proceedings of the 35 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications

and Computer Engineering, TCSET 2018 – Proceedings 2018-April, P. 1051-1054. (Scopus)

9. 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)

10. Roman Odarchenko, Nadiia Dyka, Oleh Poligenko, Liudmila Kharlai, Anastasiia Abakumova. Mobile operators base station subsystem optimization method // Science and Technology (PIC S&T) 2017:4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, 10-13 October 2017: abstracts.– Kharkiv, 2017. – P. 29-33.

11. Полігенько О.О. Методи оптимізаціїї потоків трафіку в мережах LTE// Політ. Сучасні проблеми науки: XV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 8-9 квітня 2015 р.: тези доп. – К., 2015. –С.10.

12. Одарченко Р.С., Полігенько О.О. Порівняльний аналіз технологій 3-го та 4-го поколінь // Політ-2011. Сучасні проблеми науки XV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 7–9 квітня 2010 р.: тези доп. – К., 2011. – С. 31.

13. Одарченко Р.С., Полігенько О.О. Варіанти оптимізації підсистеми базових станцій // Автоматика та комп’ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція, 16–17 листопада 2017р.: тези доп. – Кропивницький, 2017. – С.176.

14. Дика Н.В., Одарченко Р.С., Полігенько О.О., Слободян О.П. Проблеми ефективності та захищеності підсистеми базових станцій мережі LTE // IV всеукраїнська науково-практична конференція «Перпективні напрями захисту інформації», 02-06 вересня 2018 р.: тези доп. – Одеса., 2018. – С. 33 –34.

15. Сліпухіна І.А., Одарченко Р.С., Полігенько О.О. Особливості використання мови програмування C++ builder для розробки освітніх програм// Інженерія програмного забезпечення. – 2011. –№1(5). – С.56-61.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ……..……16
ВСТУП……. 17
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ МЕРЕЖІ LTE……..…25
1.1.Аналіз архітектури сучасних стільникових мереж……..…26
1.1.1. Аналіз архітектури мережі LTE……..…….26
1.1.2. Робота підсистеми базових станцій…….....30
1.1.3. Архітектура мереж 5G …….....34
1.1.4. NewRadio…….....37
1.2. Аналіз аварійних ситуацій операторів стільникового зв'язку ...…...……...…40
1.3. Проблеми технології LTE ……..…….……..…42
1.3.1.Технологічні проблеми проекту LTE …….....42
1.3.2. Незавершеність стандартизації проекту LTE …….……43
1.3.3. Низька ефективність використання радіочастотного ресурсу …...……44
1.3.4. Недостатня спектральна ефективність і абонентська ємність LTE ...……45
1.3.5. Технологічні проблеми IP мультимедійної підсистеми (IMS) ……..…... 46
1.3.6. Техніко-економічні труднощі проекту LTE ……..…….47
1.4. Проблеми, пов'язані з недостатньою функціональною стійкістю ...…..……...49
1.5. Методи планування та оптимізації систем LTE……..……....53
Висновки до розділу 1……..……....57
Список використаних джерел у першому розділі 60
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ..64
2.1. Постановка проблеми синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій ……..65
2.2. Вибір обладнання для проектування мережі LTE ……..…68
2.2.1. Побудова початкового наближення мережі LTE ……..…71
2.2.2. Методика оцінки бюджета втрат і зони покриття ……72
2.3. Формалізована постановка синтезу функціонально стійкої структури BSS…82

2.4. Метод вирішення задачі синтезу підсистеми базових станцій. Розміщення комутаторів-концентраторів в одноярусну АЦСПД ……..87
2.5. Розробка схеми вирішення проблеми синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій ……93
2.6. Обгрунтування критерію оптимізації в загальних і приватних задачах синтезу функціонально-стійких підсистем базових станцій ……97
2.7. Вибір і обгрунтування математичної моделі підсистеми базових станцій E-UTRAN. Визначення елементів підсистеми , що впливають на функціональну стійкість ……98
Висновки до розділу 2……....101
Список використаних джерел у другому розділі 103
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ……106
3.1. Методи розвантаження радіомережі і паралельного використання декількох каналів ……..…..107
3.1.1. Існуючі методи……..….107
3.1.2. Багатоканальна пердача даних в мережі 5G…….110
3.1.3. Нова архітектура ядра мережі ……..…..112
3.1.4. Приклад поділу трафіку ……....112
3.1.5. Процедури багатоканальної пердачі даних ……114
3.1.5.1. Варіанти використання: На краю області MBMS ……..114
3.1.5.2. Процедури встановлення з’єднання……....115
3.1.6. Транспортні протоколи для багатоканальної передачі даних ……122
3.1.7. Визначення характеристик каналів ……..….124
3.2. Методи підвищення енергоефективності підсистеми базових станцій ……127
3.2.1. Зниження енергоспоживання базової станції ……..…128
3.2.2. Використання альтернативних джерел енергії ……...128
3.2.3. Динамічне регулювання вживаної потужності мережі ……..130
Висновки до розділу 3…….…...135
Список використаних джерел у третьому розділі 136

РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ОПЕРАТОРІВ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ……...139
4.1. Розробка інформаційної технології ……..139
4.2. Програмне забезпечення для планування ефективної підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку ……....143
4.3. Програмне забезпечення для адаптивного підлаштування розміщення сонячних панелей для підвищення енергетичної ефективності базових станцій .149
4.4. Методика захисту програмного забезпечення на основі техніки обфускації .155
Висновки до розділу 4……....161
Список використаних джерел у четвертому розділі 164
ВИСНОВКИ ……...165
ДОДАТКИ …… 167
Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження …….. 168
Додаток Б. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження …… 169
Додаток В. Список опублікованих праць за темою дисертації …… 170

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Україномовні скорочення:

БС – Базова станція.

БУМ – Блок управління мобільністю.

УТ – Управління терміналами.

ОШ – Обслуговуючий шлюз.

ПШ – Пакетний шлюз.

Англомовні скорочення:

LTE – (Long Term Evolution), назва мобільного протоколу передачі даних.

EPC – (Evolved Packet Core).

P-GW – (PacketDataNetworkGateway),шлюз для виходу на пакетні мережі.

S-GW – (ServingGateway), обслуговуючий шлюз.

MME – (MobilityManagementEntity),протокол управління.

QoS – (Quality of service), якість послуг, що надаються.

DHCP – (DynamicHostConfigurationProtocol).

PCRF – (Policy and Charging Resource Function), сервер централізованого управління ресурсами мережі.

eNB – (evolved Node B), базова станція.

SAE – (System Architecture Evolution),архітектура ядра мережі.

RNL – (Radio Network Layer),радіо мережа.

TNL – (Transport Network Layer), транспортна мережа.

PRACH – (Physical Random Access Channel), фізичний канал вільного доступу.

BSS – (BaseStationSubsystem), підсистема базової станції.

MS – (Mobile Stations), мобільні станції.

MSC – (Mobile Services Switching Center), центр комутації.

ВСТУП

Актуальність теми.

Одним із головних напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових поколінь стільникових мереж зв'язку, зокрема, 5-го покоління (5G). Вони найбільш придатні для забезпечення високошвидкісного доступу до інформаційних ресурсів, що є дуже важливим для розширення ринку телекомунікаційних послуг. Необхідність забезпечення повсюдного високошвидкісного доступу до Інтернету, корпоративних та інших мереж визначає загальносвітові тенденції до збільшення на цьому ринку частки мереж широкосмугового безпроводового доступу. Поширенню таких мереж сприяють відносно невеликі часові і фінансові витрати на розгортання їх інфраструктури у порівнянні з проводовими мережами та можливість забезпечення широкосмугового доступу в тих регіонах, де застосування проводових мереж доступу є економічно недоцільним або неможливим. Тому впровадження новітніх високоефективних стільникових мереж нового покоління можна вважати стратегічним напрямком повсюдного забезпечення населення доступними засобами отримання, передачі та поширення інформації. Крім того ж ці вище розглянуті тенденції характерні і для концепції Інтернету речей IoT.

Постійно зростаючі потреби у високошвидкісному доступі до інформаційних ресурсів стимулюють появу і розвиток нових поколінь стільникових мереж. Серед них своїми широкими можливостями яскраво виділяються мережі LTE (Long Term Evolution). Підвищення ефективності функціонування цих мереж із урахуванням нових технологій визначає коло задач, які потребують першочергового розв'язання. До найважливіших із цих задач, які визначають інноваційну новизну сучасних телекомунікаційних безпроводових систем, належить задачі оцінки та підвищення ефективності їх функціонування. Існуючі методи підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку вже значною мірою не відповідають потребам сучасності, а тому

потребують корегування та доповнень. Тому для теоретичного обґрунтування і створення наукових основ побудови новітніх стільникових мереж поряд із удосконаленням існуючих необхідна розробка нових ефективних методів підвищення ефективності їх функціонування. При цьому, зазначені стільникові мережі повинні забезпечити ті сервіси, які не в змозі надати технології мобільного зв'язку четвертого покоління та безпроводових локальних мереж сімейства стандартів IEEE 802.11.

Слід констатувати, що ключовим елементом будь-якої стільникової мережі є підсистема базових станцій. З неї починається передаа даних. Тому дуже важливою і актуальною задачею є саме підвищення ефектиності підсистеми базових станцій.

Проблемам підвищення ефективності роботи підсистеми базових станцій операторів стільникового зв'язку присвячена велика кількість наукових робіт. Серед яких необхідно виділити роботи М.М. Климаша, В. М. Вишневського , С. Л. Портного, І. В. Шахновича, В.О. Тихвинського, В.Ф. Єрохіна та інші.

Не дивлячись на велику кількість публікацій за даною тематикою, аналіз науково-технічних джерел свідчить про те, що залишається ряд невирішених завдань, пов'язаних із підвищенням ефективності використання базових станцій, їх енерго та економічної ефективності.

Вищезгадані завдання, які вирішувались в даній дисертаційній роботі, обумовлюють 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», «Основними науковими напрямами та найважливішими проблемами фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2014-2018 роки». Основні наукові результати отримано в рамках НДР: XCast (Horizon 2020); шифр 874-ДБ13, тема "Створення

та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках Концепції CNS/ATM ICAO" (НДР 0110U000225).

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у якій дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає в розробленні ТЗ на НДР, виборі напрямку досліджень, моделюванні роботи телекомунікаційного обладнання різного призначення.

Метою дисертаційної роботи.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи підсистеми базових станцій операторів стільниквого зв'язку шляхом визначення оптимального радіусу зон обслуговування БС з урахуванням впливу додаткових парметрів на процес розповсюдження радіохвиль; розвантаження радіоінтерфейсу за рахунок використання багатоканальної передачі даних і протоколів не 3GPP стандарту; зменшення енерговитрат і адаптування випромінюваної потужності до потреб абонентів; розроблення інформаційної технології підвищення ефективності ПБС.

Вищеозначене дозволяє ефективно планувати та розміщувати БС з урахуванням максимально допустимої дальності звя'зку, економії енерговитрат, за рахунок залучення альтернативних джерел енергії тощо.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання:

1. Проаналізувати існуючі недоліки сучасних підсистем базових станцій операторів стільникового зв'язку.

2. Удосконалити метод планування підсистеми базових станцій операторів стільникового зв'язку.

3. Удосконалити метод розвантаження радіоінтерфейсу мереж стільникового радіозв'язку.

4. Розробити метод підвищення енергоефективності підсистеми базових станцій опреаторів стільникового зв'язку.

5. Розробити інформаційну технологію підвищення ефективності підсистеми базових станцій операторів стільникового зв'язку.

6. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для планування ефективної підсистеми базових станцій оператора стільникового зв’язку.

Об’єктом дослідження є процес передачі даних в сучасних стільникових мережах.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби підвищення ефективності роботи підсистеми базових станцій операторів стільникового зв’язку.

Методи досліджень.

Для досягнення поставлених цілей в дисертаційній роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів (для аналізу методів передавання інформації у широкосмугових стільникових мережах); методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль (для дослідження процесу затухання електромагнітного поля в залежності від частоти та відстані в реальних умовах експлуатації стільникових мереж); методи комп’ютерного моделювання (для перевірки адекватності розроблених моделей та методів); методи прямого синтезу (для розробки структурної схеми інфориаційної технології; натурного експерименту (для перевірки адекватності розроблених методів підвищення ефективності підсистеми базових станцій).

Наукова новизна отриманих результатів.

У роботі отримані наступні наукові результати.

1. *Вдосконалено* метод планування підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку за рахунок урахування впливу додаткових параметрів на процес розповсюдження радіохвиль, побудови функціонально-стійкої топології зв'язку між базовими станціями та порівняння варіантів побудови по вартості, що надало змогу більш точно визначати радіус зон обслуговування базових станцій та обирати найбільш оптимальний варіант по критерію вартості та функціональної стійкості.

2. *Вдосконалено* метод розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій за рахунок використання багатоканальної передачі даних, додаткового

радіоінтерфейсу не-3GPP стандарту, протоколів MPQUIC, MPTCP та MLPPP та динамічного зваженого балансування навантаження, що надало змогу більш ефективно використовувати канали транспортної мережі, зменшувати навантаження на базові станції, підвищувати економічну ефективність використання радіоінтерфейсу, збільшувати кількість активних абонентів та одночасно використовуваних сервісів.

3. *Вперше* розроблено метод підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, який на відміну від відомих, полягає в послідовному використанні процедур розвантаження радіоінтерфейсу базових, альтернативних джерел відновлюваної енергії, адаптивного енергоспоживання, що дозволяє зменшити витрати енергії, адаптувати випромінювану потужність до потреб абонентів та підвищити економічну ефективність підсистеми базових станцій.

4. *Вперше* розроблено інформаційну технологію підвищення ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, яка на відміну від відомих, за рахунок використання удосконаленого методу планування підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій та методу підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку дозволяє зменшити енергетичні витрати, витрати на побудову та експлуатацію підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, а отже підвищити технічну, енергетичну та економічну ефективність підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів.

Теоретичні результати, отримані в ході дисертаційного дослідження, відкривають можливість виявити та запропонувати нові практичні шляхи підвищення ефективності підсистем базових станцій стільникових мереж в Україні. При цьому отримані результати дозволяють: більш точно оцінювати максимально допустиму дальність радіозв’язку; більш ефективно планувати

розміщення базових станцій; впроваджувати нові алгоритми розвантаження стільникових мереж зв'язку.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в такому:

- вдосконалено методику оцінки радіусу зон покриття базових станцій;

- розроблено алгоритм розвантаження радіоінтерфейсу мереж п'ятого покоління із використанням мереж стандартів не 3GPP;

- розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для адаптивного підлаштування положення сонячних панелей з метою більш ефективного живлення базових станцій;

- розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для планування підсистеми базових станцій стільникових опеарторів;

- удосконалено методику захисту програмного забезпечення мобільного оператора та розроблене відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення.

Матеріали дисертаційної роботи упроваджено в діяльність ТОВ «Водафон Україна» та в навчальний процес Національного авіаційного університету та Київського коледжу зв'язку. Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача.

Дисертаційне дослідження є самостійно виконаною роботою в якій відображено особистий авторський підхід, отримані теоретичні та практичні результати, які відносяться до оцінки та підвищення ефективності сучасних стільникових мереж. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить: визначення проблемних місць в підсистемі базових станцій оператора стільникового зв'язку [1]; моделювання оцінки підвищення енергоефективності підсистеми базових станцій [2]; удосконалення техніки обфускації для управління інформаційною безпекою підприємства (операторів мобільних мереж) [3]; удосконалення впровадження криптосистеми [4]; аналіз оптимальних параметрів для алгоритмів множинного доступу сучасних радіосистем [5]; проведення експериментальних досліджень пропускної здатності мереж Wi-Fi [6]; вивчення

причин виникнення аварійних ситуацій операторів стільникового зв'язку [7]; розробка процедур для розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж 4G/5G із використанням мереж Wi-Fi [8]; вибір параметрів для планування зон обслуговування сучаспних радіотехнологій [9]; розробка методу оптимізації підсистеми базових станцій для операторів стільникового зв'язку [10]; методи оптимізації потоків трафіку в мережах LTE [11]; порівняльний аналіз технологій стільникових мереж 3-го та 4-го поколінь [12]; дослідження різних альтернатив оптимізації підсистеми базових станцій [13]; визначення основних проблемних місць в підсистемі базових станцій оператора стільникового зв'язку [14].

Апробація результатів дисертації.

Основні практичні та теоретичні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях і семінарах: Міжнародна науково-практична конференціїя «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» (Київ, 2015 – 2017 рр.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція "Комп'ютерні системи і мережні технології" (Київ, НАУ, 2017 р.); Міжнародна науково-технічна конференція "ITSEC" (Київ, НАУ, 2017 р.); Міжнародна науково-технічна конференція "ABIA-2017" (Київ, НАУ, 2017 р.); Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів "Політ. Сучасні проблеми науки" (Київ, НАУ, 2011 р., 2015 р.); Перша міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології» (Харків, ХНУРЕ, 2017 р.), IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Перпективні напрями захисту інформації» (Одеса, 2018 р.), Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція (Кропивницький, 2017р.).

Публікації.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано **14** наукових праць, в тому числі: 4 статі у фахових виданнях, які включені до переліку МОН, 2 статі у закордонних періодичних фахових виданнях, 8 матеріалів доповідей на

міжнародних науково-технічних конференціях, з них 2 індексуються у наукометричній базі Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 166 сторінок друкованого тексту, у тому числі містить 34 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел на 11 сторінках містить 112 найменувань, а також 3 додатки на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1
ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ МЕРЕЖІ LTE

На сучасному етапі розвитку суспільства інформаційні та телекомунікаційні технології стають основними чинниками розвитку світової економіки. Наразі триває процес стрімкого зростання потреб користувачів у наданні інфокомунікаційних послуг, причому незалежно від способів абонентського доступу.За останній час це викликало процес конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж, побудованих за різними принципами. Створення нових технологій – це крок до створення єдиного інформаційного суспільства, де географічні кордони втрачають свій економічний сенс.

У наш час в якості складних інформаційних мереж доцільно використовувати сучасні та перспективні мережі 4 покоління (4G), які є безпровідними, динамічними та самоорганізуючими.Робота складних систем в даний час пов'язана з оперуванням великою кількістю даних [1].Умовою успішного управління складною системою є прийняття вірних рішень по її подальшому функціонуванню і розвитку. Оператори повинні пам’ятати про необхідність забезпечення заданих показників якості обслуговування. Зібрані відомості необхідно певним чином зберігати, отримувати на їх основі наочні результати, а також обробляти різну інформацію про стан систем.Такими системами є стільникові мережі оператора зв'язку, в роботі яких складність представляє збір інформації про стан устаткування, що експлуатується, в тому числі і базових станцій. Проте мобільні мережі зв'язку в даний час займають домінуюче становище на ринку передачі даних . Труднощі при зборі інформації про стан базових станцій визначаються великою кількістю чинників, що впливають на їх стан, недосконаліть процесів отримання і обробки отриманих відомостей. Все це призводить до зниження ефективності управління

обладнанням і до прийняття неправильних рішень щодо розвитку всієї мережі в цілому.

Тому основними завданнями, які вирішуватимуться в першому розділі даного дисертаційного дослідження, є наступні:

1. Детально проаналізувати архітектуру мережі LTE та 5G. Зокрема, необхідно визначити основні елементи, особливості та технічні характеристики цих мереж, з'ясувати основні переваги та вимоги, висунуті до мереж 4-го покоління.

2. Провести аналіз аварійних ситуацій операторів стільникового зв'язку. Необхідно з'ясувати, які були порушення в мережах зв'язку стільникових операторів для покращення якості послуг стільникового зв'язку.

3. Розглянути основні технологічні проблеми мереж LTE та проблеми, пов'язані з недостатньою функціональною стійкістю.Зокрема, необхідно приділити увагу функціональній стійкості, її властивостям та недолікам.

4. Визначити методи планування та оптимізації систем LTE. Необхідно розглянути концепцію планування та її аспекти, визначити відмінності аналогічного процесу для інших технологій. Також розглянути концепцію оптимізації, встановити переваги та недоліки, напрями їх удосконалення, а також детально розглянути основні методи оптимізації.

1.1. Аналіз архітектури сучасних стільникових мереж

1.1.1 Аналіз архітектури мережі LTE

LTE – це новітній стандарт безпровідної передачі даних, який еволюціонував з мережі третього покоління.[2] Мережа 4G включає в себе два важливих компоненти, а саме базові мережі SAE та мережу радіодоступу E-UTRAN. Мережа LTE приведена на рис. 1.1.

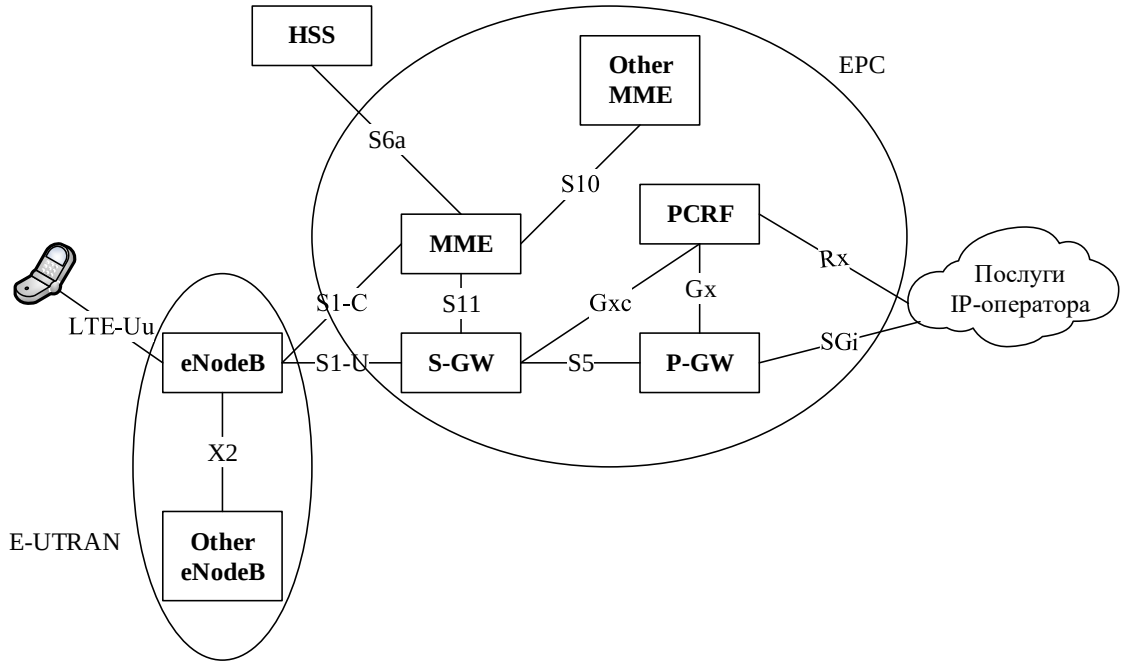


Рис. 1.1 Структура мережі LTE
[http://1234g.ru/4g/lte/printsip-raboty-seti-lte/printsipy-postroeniya-i-funktsionirovaniya-setej-lte]

Архітектура базової мережі SAE (SystemArchitectureEvolution) системи LTE має на меті створення такої структури мережі, яка дозволить здійснювати еволюцію або міграцію мереж 3G в напрямку ще більш високих швидкостей передачі даних, низьких затримок, систем, оптимізованих для передачі пакетів даних і таких, що будуть використовувати різноманітні технології радіодоступу. Основними вимогами 3GPP до базової мережі SAE є максимально можливе спрощення структури мережі і виключення дублюючих функцій мережевих протоколів.

Основним принципом побудови архітектури базової мережі SAE є концепція "All-IP " (інша назва AIPN - All-IP Network), а також те, що доступ до мережі LTE може здійснюватися не тільки через мережі UTRAN і GERAN, але і через Wi-Fi, WiMAX, або інші мережі, що використовують провідні IP-технології.[3]

Виходячи з вищезначеного можемо визначити особливості архітектури мережі LTE:

- сумісність базових мереж стандартів 3GPP з базовою мережею SAE, починаючи з Release 6;

- забезпечення мінімальних затримок передачі даних, згідно з протоколом управління у площині C-plane;

- підтримка стандартів радіодоступу не 3GPP, так і стандартів 3GPP;

- встановлення IP-з'єднання при мінімальній кількості транзакцій з індивідуальними параметрами QoS;

- процедури підтримки хендовера у мережах E-UTRAN, між мережами E-UTRANта іншими мережами радіо доступу 3GPP, а також між мережами E-UTRAN/3GPP та мережами радіо доступу не 3GPP повинні бути реалізовані з мінімальною втратою пакетів даних в режимі реального часу;

- процедура отримання даних про місцезнаходження абонентського терміналу з мінімальним завантаженням каналів сигналізації;

- підтримка різних IP-протоколів (IPv4 та IPv6), а також режиму мовлення IPMulticast;

- підтримка всіх існуючих принципів тарифікації.

До складу основних елементів мережі стандарту LTE входять[4]:

Керуючий блок MME-забезпечує безпеку роботи в мережі через який проходить весь сигнальний трафік між UE і Core Network (CN). Протоколи, які використовуються для передачі контрольного трафіку між UE і CN, відомі як NAS (Non-Access Stratum).

Функції, що виконуються MME:

- сигналізація між мережею EPC і UE.
- вибір P- GW і S- GW
- вибір SGSN в разі коли здійснюється хендовер в мережі 2G або 3G
- роумінг
- законне перехоплення сигналізації

- аутентифікація: при реєстрації UE в мережі, MME порівнює його постійний реєстраційний номер з номером,що знаходиться в базі даних HSS (Home Subscription Server) для перевірки його справжності.

- управління каналами на інтерфейсах до інших елементів мережі

S-GW (Serving Gateway - обслуговуючий шлюз) призначений для обробки і маршрутизації пакетних даних, що надходять з / в підсистему базових станцій. SGW має пряме сполучення з мережами другого і третього поколінь того ж оператора, що спрощує передачу з'єднання в / з них з причин погіршення зони покриття, перевантажень і т.п. У SGW немає функції комутації каналів для голосових з'єднань, тому що в LTE вся інформація, включаючи голос комутується і передається за допомогою пакетів.[40]

S-GW відповідає за виконання таких функцій:

- вибір точки прив'язки ("якоря") локального місця розташування (Local Mobility Anchor) при хендовері;

- буферизація пакетів даних в низхідному напрямку, призначених для UE, що знаходяться в режимі очікування, і ініціалізація процедури запиту послуги;

- санкціоноване перехоплення інформації користувачів;

- маршрутизація і перенаправлення пакетів даних;

- формування облікових записів користувачів і ідентифікатора класу якості обслуговування для тарифікації;

- тарифікація абонентів.

P-GW (Packet Data Network Gateway- пакетний шлюз)пакетний шлюз забезпечує з'єднання від UE до зовнішніх пакетних мереж даних, будучи точкою входу і виходу трафіку для UE. UE може мати одночасно з'єднання з більш ніж одним P-GW для підключення до декількох мереж. PGW виконує функції захисту, фільтрації пакетів для кожного користувача, підтримку білінгу, узаконеного перехоплення і сортування пакетів.[40]

Основне завдання PGW полягає в маршрутизації трафіку мережі LTE до інших мереж передачі даних, таких як Інтернет, а також мереж GSM, UMTS.

PCRF (Policy and Charging Rules Function - вузол виставлення рахунків абонентам елемент мережі стільникового зв'язку стандарту LTE, який відповідає за управління нарахуванням плати за надані послуги зв'язку, а також за якість з'єднань відповідно до заданих конкретному абоненту характеристиками.

HSS (Home Subscriber Server - сервер абонентських даних мережі): являє собою велику базу даних і призначений для зберігання даних про абонентів. HSS фактично замінює набір регістрів (VLR, HLR, AUC, EIR), які використовувалися в мережах 2G і 3G.Крім того, HSS генерує дані, необхідні для здійснення процедур шифрування, аутентифікації і т.п. Мережа LTE може включати один або декілька HSS. Кількість HSS залежить від географічної структури мережі і числа абонентів.

Основним досягненням такої архітектури, в порівнянні з попередніми поколіннями є менші затримки при передачі як призначених для користувача даних, так і керуючої інформації в зв'язку з проходженням через менше число проміжних елементів.[40]

Обмін даними в мережі EPC відбувається тільки по IP протоколу з комутацією пакетів, що суттєво відрізняє мережу LTE від мереж попередніх поколінь, в яких використовувалася комутація каналів між окремими елементами. До цієї мережі входять елементи, що відповідають за управління, маршрутизацію, комутацію і зберігання різних даних.

Пакетна передача дозволяє забезпечити всі послуги, включаючипередачу призначеного для користувача голосового трафіку. На відміну від більшості мереж попередніх поколінь, в яких спостерігається достатньо висока різнотипність і ієрархічність мережевих вузлів (так звана розподілена мережева відповідальність).

1.1.2 Робота підсистеми базових станцій

Мережа радіодоступу EUTRAN розроблена як частина мережі All-IP, тому мережа доступу LTE більше не має елементів, заснованих на комутації

каналів.Широкомовні і загальні канали специфіковані в більш ранніх версіях 3GPP (HSDPA, HSUPA, MBMS), також використовуються в LTE.

EUTRAN є частиною радіодоступу (RAN) LTE або LTE Advanced мобільної мережі.[5] Вона може передавати багато типів трафіку (голос і, дані) в пакетному режимі, використовуючи виключно IP-протоколи. EUTRAN дозволяє встановити з'єднання між призначеним для користувача обладнанням (мобільним телефоном або смартфоном) і базової мережею (EPC: Evolved Packet Core) мобільного оператора.

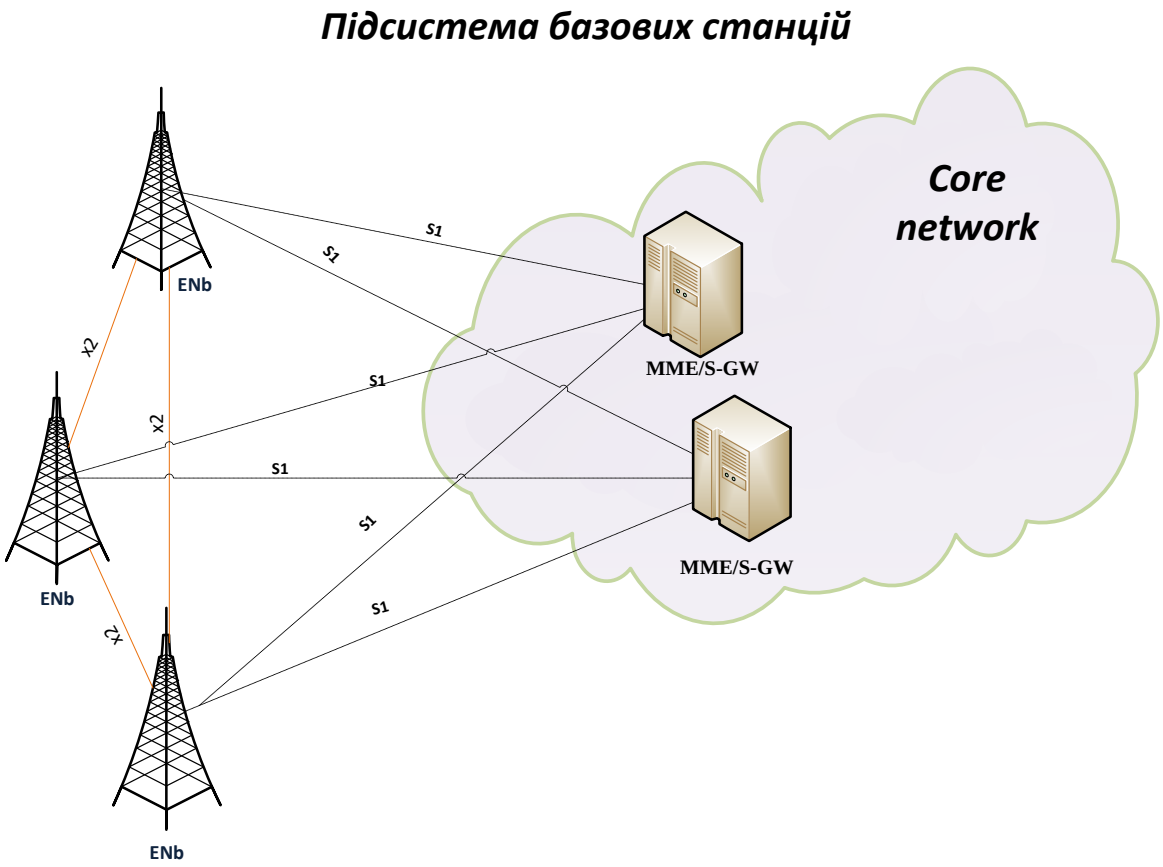


Рис. 1.2. Підсистема базових станцій (E-UTRAN)

Мережа радіодоступу E-UTRAN побудована як сукупність вузлів базових станцій eNB (E-UTRAN NodeB або eNodeB), та бере на себе функції радіоінтерфейсу і є сполучною ланкою між терміналами (UE) і мережею EPC[5]. Сусідні eNBз'єднані між собою за принципом «кожний з кожним»та можуть обмінюватися між собою інформацією по протоколу X2 і здійснювати функції управління.

На відміну від стандарту GSM, де підсистема базових станцій BSS складалася з базового приймача BTS і контролера базових станцій BSC в мережі LTE в одному елементі eNodeB об'єднані функції передавача і контролера. За рахунок цього спрощується розширення мережі, тому що не потрібно розширення ємності контролерів або додавання нових.

У мережі радіодоступу радіоінтерфейс між UE і eNB здійснений на основі технології ортогонального частотного рознесення (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDMA). Робота EPC заснована на технології IP. Таку структуру відносять до All-IP Network (AIPN).

eNB об'єднує в собі функції базових станцій і контролерів мереж 3-го покоління[6]:

- забезпечує передачу трафіку і сигналізації по радіоканалу,
- управляє розподілом радіоресурсів,
- забезпечує наскрізний канал трафіку до S-GW,
- підтримує синхронізацію передач і контролює рівень перешкод в стільнику,
- забезпечує шифрування і цілісність передачі по радіоканалу,
- вибирає MME і організовує сигнальний обмін з ним,
- виробляє стиснення заголовків IP-пакетів,
- підтримує послуги мультимедійного мовлення.

eNB підключені до EPC за допомогою інтерфейсу S1.Прі цьому інтерфейс S1 в призначеній для користувача площині S1-U (User Plane) безпосередньо замикається на обслуговуючий шлюз S-GW (Serving Gateway), в той час як сигнальна частина інтерфейсу S1-C (Control Plane) слідує на MME - Mobility Management Entity.

Інтерфейси X2 використовують для організації хендовера між сусідніми базовими станціями, в тому числі і при балансуванні навантаження між ними[6]. При цьому інтерфейси X2 можуть бути логічними, тобто для їх організації не обов'язково реальне фізичне з'єднання між eNB.

Імовірно, інтерфейс S1 виконується в основному за сполученням «точка - точка» між контролерами і eNB, але з'єднання «точка - безліч точок» також можливі. А, інтерфейсX2, зазвичай, виконується по багатоточковим з'єднанням між підмножиною сусідніх осередків, що знаходяться в одній підмережі IP. Кількість осередків може досягати 32 і 64. Нижче приведена таблиця (Таблиця 1.1.), де порівнюються функції безпеки на інтерфейсахS1 та X2[7].

Таблиця 1.1

Функції безпеки на інтерфейсах S1 та X2

Інтерфейс	**Площина користувача/управління**	**Аутентифікація**	**Цілісність**	**Шифрування**
S1	▪ Площина користувача	-	-	V
	▪ Площина сигналізації	V	V	V
X2	▪ Площина користувача	-	-	V
	▪ Площина сигналізації	V	V	V

1.1.3. Архітектура мереж 5G

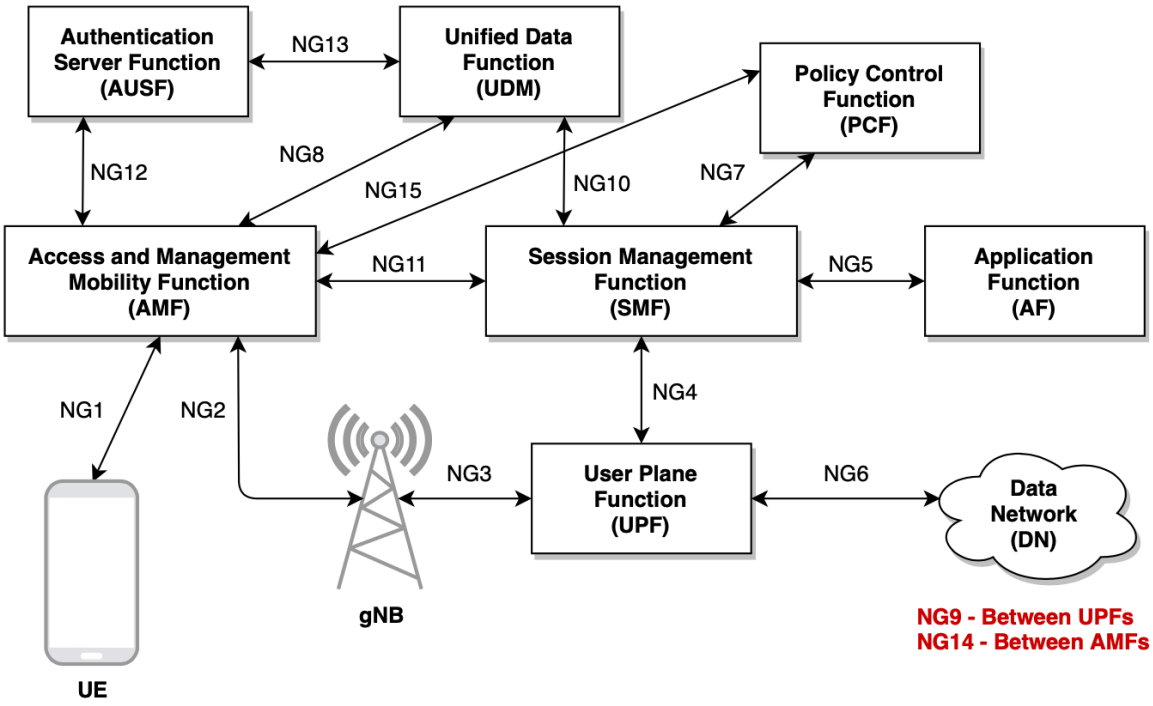


Рис.1.3 Архітектура мережі 5G

[http://www.techplayon.com/5g-reference-network-architecture/]

Високорівнева архітектура мереж 5G представлена на рис. 1.3. Новим елементом підсистеми радіодоступу є базові станції нового покоління - gNb. і LTE-базові станцій (eLTEeNBs). LTE-базові станції, в цьому випадку, взаємодіють з опорною мережею нового покоління (NewGenerationCore, NGC).

Всі вузли в підсистемі радіодоступу мають логічні з'єднання між собою - інтерфейси Xn, а також з'єднуються з опорною мережею NGC через інтерфейси NG. До складу нової опорної мережі NGC входять шлюзи для трафіку управління і призначеного для користувача трафіку (NewGenerationControlPlane / UserPlaneGateWay, NG-CP / UPGW).

Також архітектура мереж 5G в себе ключає такі елементи як:

AMF (Access and Mobility Management Function) – мережева функція управління доступом і мобільністю абонентських пристроїв в режимі очікування[8,9] . Ця функція є аналогічна MME в мережах LTE.

AMFздатна вирішувати такі задачі[9]:

- організація інтерфейсів площині управління N1, N2;
- організація обміном сигналізації NAS через інтерфейс N1, шифрування і захист цілісності сигналізації NAS;
- управління реєстрацією призначеного для користувача терміналу (UE) в мережі і контроль можливих станів реєстрації (RM-DEREGISTERED, RM-REGISTERED);
- управління з'єднанням призначеного для користувача терміналу (UE) з мережею і контроль можливих станів сполуки (CM-IDLE, CM-CONNECTED);
- управління доступністю для користувача терміналу (UE) в мережі в стані CM-IDLE;
- управління мобільністю призначеного для користувача терміналу (UE) в мережі в стані CM-CONNECTED;
- аутентифікація доступу;
- авторизація доступу;
- забезпечення передачі коротких повідомлень між обладнанням користувача (UE) і SMF;
- забезпечення якірної функції безпеки (SEAF - Security Anchor Functionality);
- забезпечення функції безпекою зв'язку (SCM - Security Context Management);
- передача повідомлень між UE і функцією управління місцем розташування LMF (Location Management Function), а також між RAN і LMF;
- виділення ідентифікатора потоку даних EPS (Evolved Packet System) для взаємодії з EPS;

UPF (User Plane Function) - функція площини користувача, виконує такі задачі[9]:

- управління QoS для площини користувача;
- маршрутизація та переадресація пакетів;

- пакетна перевірка та дотримання правил політики;

- законне перехоплення (площина користувача);

- облік трафіку та звітність.

SMF (Session Management Function) - функція управління сесіями підтримує наступне:

- управління сесіями;

- визначення та керування IP-адресами обладнання користувача (включаючи необов'язкову авторизацію);

- вибір і контроль функції площини користувача;

- завершення інтерфейсів до стратегічного управління та функцій обліку вартості;

- контрольна частина стратегічного виконання QoS;

- законне переривання (для подій управління сеансами і інтерфейсу до системи законного переривання);

- припинення керування сеансом частин повідомлень NAS;

- повідомлення про передачу даних по низхідній лінії зв'язку;

- ініціатор вузла доступу до конкретної інформації про керування сеансом, надсилається через AMF через NG2 до вузла доступу;

- функція роумінгу;

- справлятись з місцевим здійсненям для застосування служб кваліфікаційного обслуговування (VPLMN);

- збір даних про вартість розмови та білінговий інтерфейс;

- законне переривання (в VPLMN для подій управління сеансами і інтерфейсу до системи законного переривання).

AUSF (Authentication Server Function) - функція сервера аутентифікації

AUSF бере участь в реалізації функцій безпеки, включаючи взаємну аутентифікацію між користувачем і мережею, а також формування ключів для алгоритмів шифрування і контролю цілісності[8].

UDM (Unified Data Management) – функція уніфікованого управління даними підтримує:

- управління даними профілів користувачів, включаючи зберігання і модифікацію переліку доступних користувачам послуг і відповідних їм параметрів;
- управління реєстрацією користувача (тобто, зберігання обслуговуючого AMF);
- управління доставкою SMS повідомлень;
- зберігання інформації про передплату.

PCF (Policy Control Function) – функція управління політиками в реальному часі формує і призначає призначеним для користувача терміналів ті чи інші політики, включаючи параметри якості обслуговування (QoS) і правила таріфкації. Так, для передачі того чи іншого типу трафіку можуть динамічно створюватися віртуальні канали з різними характеристиками. При цьому, до уваги можуть прийматися вимоги сервісу, запитуваної абонентом, його профіль, місце розташування, рівень завантаження мережі, обсяг спожитого трафіку і т.д.[40]

DN (Data Network) – операторські послуги, доступ в Інтернет або інші послуги**[8,9]**

AF (Application Function) – функція додатків

Ця функція взаємодіє з опорною мережею і, як приклад, може вирішувати такі завдання:

- управління маршрутизацією трафіку;
- надання доступу до модуля забезпечення взаємодії з елементів мережі (NEF);
- взаємодія з функцією управління політиками.

1.1.4. NewRadio

5G NR (Newradio) - це міжнародний стандарт для нового радіоінтерфейсу, що пов'язаний з новим бездротовим стандартом на основі OFDM та є основою для

5G мережі нового покоління, так само як LTE для 4G[10]. Він забезпечить підтримку всіх пристроїв і сервісів 5G, будезначно покращено гнучкість, масштабованість та ефективність, як з точки зору споживання енергії, так і спектру[10].

5G New Radio здатний забезпечувати зв'язок для дуже високих частот з прямими трансляціями, такими як потокове відео, а також зв’язок з низькою затримкою для комунікацій з дистанційним керуванням [11]. Окрім цього, 5G NR зможе надати величезну кількість різноманітних послуг, що надаються на різноманітному наборі пристроїв з різними вимогами до продуктивності та затримки; підтримувати широкий діапазон моделей розгортання від традиційних макросів до розгортання точок доступу.

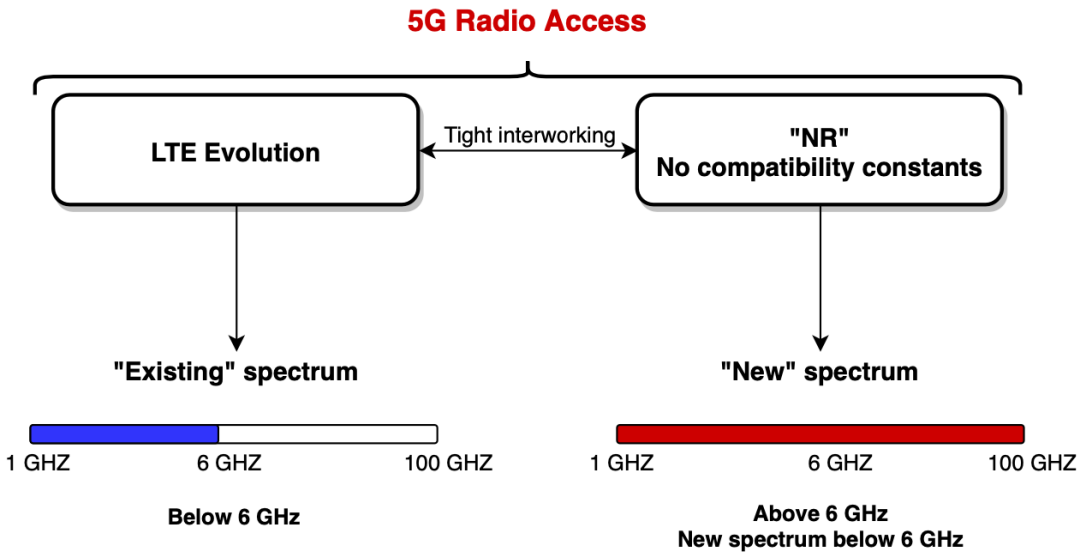


Рис.1.4 Радіодоступ 5G

[https://pdfs.semanticscholar.org/5f21/dbe32d91d39f0a8adcc137b2d970f7f80ccf.pdf]

На рис 1.4. показано радіодоступ 5G, який включає технологію LTE Evolution та нову технологію радіодоступу (NewRadio), яка не є сумісною з технологією LTE і працює на частотах від 1 ГГц до 100 ГГц.

У свою чергу, стандарт 5G NR буде використовувати нові частотні діапазони, що забезпечить збільшення швидкості обміну даними при зниженні

латентності [11]. Саме цей режим розроблений в якості фундаменту на перші роки розвитку і впровадження мереж 5G.

Ядро мережі 5GNR охоплює такі три фундаментальні елементи:

Оптимізовані сигнали на основі OFDM та багатостанційний доступ[10, 12]. Раннє рішення було прийнято для використання сімейства форм OFDM (ортогональне частотне розділення) для 5G, хоча точна форма сигналу та реалізація багаторазового доступу ще не вирішена, і кілька варіантів OFDM розглядаються для різних випадків використання та розгортання.

Спільна гнучка система, яка зможе ефективно мультиплексувати різноманітні послуги 5G та забезпечить сумісність майбутніх послуг. Це дозволить забезпечити меншу затримку, а також масштабованість при набагато меншій затримці, ніж це можливо з існуючими мережами LTE.

Розширені бездротові технології для забезпечення нових рівнів продуктивності та ефективності, що дозволить забезпечити широкий спектр послуг 5G. Існує три загальні служби 5G, а також деякі передові технології бездротового зв'язку, необхідні для їх реалізації [12]:

- *Розширення мобільного широкосмугового доступу(eMBB)* – це мобільний широкосмуговий доступ, покращений за рахунок збільшення ємності та покриття мережі, збільшення пікової та середньої швидкостей передачі даних, а також швидкості передачі даних на межі стільнику.

- *Наднадійний зв'язок з малою затримкою (uRLLC)* є обов'язковою вимогою для нових критично важливих послуг (промисловий Інтернет, інтелектуальні мережі, захист інфраструктури, інтелектуальні транспортні системи (ITS).

- *Масова комунікація «розумних» пристроїв і машин (mMTC)* служить для забезпечення роботи 5G в умовах підключення величезної кількості пристроїв і датчиків Інтернету речей (IoT).

1.2. Аналіз аварійних ситуацій операторів стільникового зв’язку

Мобільний зв'язок і мобільний Інтернет - це вже не привілейована послуга для обмеженої кількості користувачів, а повсякденно використовуваний сервіс, який задіяний в дуже багатьох сферах життя. На сучасному ринку послуг зв'язку, на якому попит на послуги зв'язку досяг максимуму, основну увагу операторів зв'язку спрямовано на розширення переліку послуг та підвищенняїх якості.

Максимальне задоволення попиту споживачів на телекомунікаційні послуги, збільшення обсягів послуг та підвищення їх якості є одним з напрямків державного регулювання в сфері телекомунікацій. Одночасно законодавством визначено, що оператори телекомунікацій зобов'язані надавати телекомунікаційні послуги за встановленими показниками якості.

Проте в реальному житті не завжди відбувається якісне та безперебійне надання телекомунікаційних послуг користувачам. Нерідко абоненти стикаються з ситуацією, коли базовий функціонал дає збої. Зокрема, телефон перестає приймати дзвінки. Проблема може торкнутися клієнта абсолютно будь-якого провайдера -Vodafone, Lifecell, Kyivstar та ін. Суть проблеми полягає в тому, що потенційний співрозмовник, здійснюючи виклик, отримує сигнал зайнятої лінії (короткі гудки) або повідомлення від оператора, що «абонент недоступний».

Причиною цього можуть бути різні збої та порушення в мережах зв’язку стільникових операторів.

Слід розуміти, що мережа оператора - складна система, робота якої залежить від великої кількості обладнання і програмного забезпечення. Тисячі людей щодня працюють над забезпеченням якості зв'язку. А від помилок і проблем не застрахований ніхто.

Збої у операторів відбуваються рідко, але все ж трапляються. Горить і рветься кабель, «падають» сервера, дає збій програмне забезпечення.

Можна навести деякі приклади:

Наприклад, випадок, який стався 25 січня 2013 року в результаті виникнення помилки програмного забезпечення одного з маршрутизаторів, відбувся

технічний збій в роботі обладнання мережі Київстар, який відбився на стабільності надання послуг голосової телефонії, SMS та передачі даних для частини користувачів. Зв’язку не було 40 хвилин. [13]

Також в цього оператора ще були випадки порушень в мережі. Так, 18 липня 2013 року виникли проблеми зі зв’язком черезбій у програмному забезпеченні IP мережі, який сильно позначився на роботі систем, що обслуговують мобільний сегмент.[14]

3 березня 2016 року стався обрив оптоволоконної лінії стільникового оператора «МТС Україна» [15].Через це, у більшості клієнтів виникали труднощі з послугам мобільного зв’язку протягом дня.

На тимчасово непідконтрольній частині Донецької області 22 лютого 2017 року був відсутній зв'язок мобільного оператора «Lifecell». Представникикомпанії мобільного оператора «Lifecell» заявили, що перебої в роботі мобільного зв'язку з'явилися через пошкодження обладнання радіомережі.[16].

Тому, згідно з проведеним аналізом працездатності стільникових операторів, можна сказати, що не завжди стільникові оператори надають високу якість зв’язку. Одним з ключових напрямків розвитку телекомунікацій є покращення якості послуг стільникового зв’язку.Діяльність стільникових операторів здійснюється в конкурентному ринковому середовищі, а конкурентні переваги операторів зв'язку досягаються не тільки завдяки впровадженню найпередовіших технічних засобів передачі та комутації, а й шляхом підвищення обслуговування клієнтів.

Моніторинг якості послуг зв'язку здійснюється шляхом вимірювання на мережі зв'язку, які можуть спиратися на статистичні дані або контрольні вимірювання, так і напідставі опитувань користувачів послугами зв'язку та аналізу поданих ними претензій.

Результатами моніторингу якості послуг зв'язку є:

• повідомлення регулюючого органу на Web-сайті, в прес-релізах;

• публікації у засобах масової інформації;

• накладення адміністративного штрафу;

• судові розгляди.

1.3. Проблеми технології LTE

1.3.1. Технологічні проблеми проекту LTE

Згідно з визначеними стандартами Сектора радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-R) взяв під свій контроль вимоги до мобільної технології 4-го покоління (4G), прив'язавши її до специфікації відомої, як IMT-Advanced[17]. Даний документ регламентує до швидкості вхідних даних в 1 ГБіт/с для стаціонарних терміналів та 100 Мбіт/с для мобільних терміналів. Дана швидкість в сотні разів швидша в порівнянні з IMT-2000. Це дійсно великі швидкості, які мають змогу обігнати пряме включення до широкосмугового каналу.

По формальним ознакам прийнятими ITU-R до 4G відносяться такі технології, як WirelessMAN-Advanced (IEEE 802.16m), LTE-Advanced або WiMAX Release 2.0 і то виключно за показниками пікової пропускної спроможності[17,19].

Нажаль, вищезгадані показники є настільки агресивними, що жоден з комерційних стандартів в світі не відповідає їм. Історично склалося так, що LTE та WiMAX, які були призвані досягнути такого ж успіху, як CDMA2000 і GSM, вважаються технологіями 4-го покоління. Але це не зовсім так, загалом ці стандарти використовують нові, надзвичайно ефективні схеми мультиплексування (OFDMA, що стосується старих систем TDMA та CDMA, які ми використовували останнім часом), але в них є значний недолік, відсутність каналу для передачі голосу. Вся пропускна спроможність використовується для послуг передачі даних. Враховуючи це, як сильно сучасні мобільні термінали орієнтовані на передачу даних, можна вважати це гарним рішенням.

Що стосується LTE, основним його недоліком є швидкість передачі даних, теоретично ця швидкість знаходиться на рівні 100 Мбіт/с і 40 Мбіт/с, на практиці реальна швидкість комерційних мереж не перевищує швидкість 30 Мбіт/с та 4

Мбіт/с відповідно. Оновлення даних стандартів – LTE-Advanced і WiMAX обіцяють зробити цю роботу, але до сіх пір вона не завершена і реальних мереж, які їх використовують, взагалі не існує. Ти не менш, ця обставина не заважає маркетологам рекламувати LTE, як повноцінну технологію LTE[20]. Також потрібно зауважити, що технологія LTE-Advanced визначається, як мобільна технологія, яка задовольняє вимогам по спектральній ефективності і піковій швидкості передачі даних за рахунок наступних механізмів:

- підвищення продуктивності за рахунок використання технології MIMO;
- розширення загальної робочої полоси частот з можливістю об'єднання несучих;
- підтримка однорідних мереж;
- розширення функціоналу термінального обладнання для підтримки фіксованого радіодоступу;
- реалізація механізмів мобільності мережі LTE (SON).

Слід звернути увагу на те, що стандартизація LTE-Advanced почалась вже після того, як найбільші комерційні виробники заявили про вихід на ринок з повноцінним рішенням LTE (Release 8 3GPP). Звідси можна зробити висновок, що більшість рішень LTE – це вдосконалені рішення 3GPP.

1.3.2. Незавершеність стандартизації проекту LTE

Основною з проблем в LTE, як зазначалось вище, є те, що не існує загальноприйнятої технології передачі голосу в мережі 4G, а ось тут виникає ще одна проблема випуску термінального обладнання, оскільки є велика ймовірність того, що з часом вони виявляться несумісними з аналогічними мережами та рішеннями LTE. Серед основних причин провалу проекту LTE з використанням голосу, можна сміливо назвати неминучість масштабних інвестицій в нову сучасну голосову інфраструктуру, при неясних термінах її окупності на фоні зниження тарифів, або їх оптимізації. Необхідність збереження всіх існуючих функцій в частині голосових послуг та передачі повідомлень, в тому випадку і для

абонентів, які знаходяться в роумінгу, обмежена зона покриття LTE на перших етапах і пов’язані з цим проблеми по забезпеченню неперервності голосових послуг, неготовність клієнтських мобільних терміналів та ряд інших технічних і економічних складнощів[20].

В проблемі передачі голосу є велика небезпека мобільному бізнесу, оскільки великий відсоток для комерційних мобільних підприємств надходить від голосових послуг, майже 79% - відсотки від сукупного доходу. А суть небезпеки полягає в тому, що чим більше мобільні оператори будуть затягувати з запуском голосових послуг в мережі LTE, тим більший шанс вони надають для діяльності провайдерів на кшталт Viber, Telegram, Skype, WhatsApp, які на даний час активно захоплюють ринок голосових послуг, відеозвінків, активні списки клієнтів з динамічним відображенням їх стану, швидкісним обміном текстовим повідомленнями, відео повідомленнями та іншим.

Через відсутность на даний час в LTE стандартизованих голосових рішень, мобільні оператори вимушені будуть використовувати діючі мобільні мережі 2G/3G в роумінгу і UMTS, які здійснюють обробку голосового трафіку в режимі комутації каналів і з неминучим через це транскодування, не враховуючи того, що ця технологія малоефективна для розвитку VoIP сервісів [21].

1.3.3. Низька ефективність використання радіочастотного ресурсу

На даний час спостерігається відсутність чіткої згоди між усіма учасниками в питанні ринкового попиту на спектр LTE. Також слід зазначити, що наразі чітко не визначені, саме який радіочастотний ресурс потрібно виділити для повноцінного функціонування мережі 4-го покоління[22]. Для цього Україна залучилася підтримкою аналітичної фірми Analysys Mason. Вона виконає дослідження робочої групи з впровадження 4G, до якої входять сім операторів, а саме: «Датагруп», «Перший інвестиційний союз», «Vodafone», «Київстар», «Lifecell», «Інтернаціональні телекомунікації», «Інтелектуальні телекомунікації».

Відповідно до результатів першого етапу роботи британської компанії Analysys Mason, в найближчій перспективі, майбутнім операторам знадобиться, як мінімум додаткових 50 МГц низхідного каналу зв'язку з комбінацією високих і низьких радіочастот.

В перспективі на найближчі 15-20 років операторам 4-го та 5-го покоління зв'язку знадобиться додатково, як мінімум 220 МГц додаткових радіочастот. Як стверджують аналітики, при певних сценаріях розвитку ринку, ліцензування і росту трафіку, може виникнути потреба в рості спектру до 380 МГц. Наступним етапом потрібно буде внести зміни в розподіл спектру, також зробити аналіз для усунення інтерференції між військовими та цивільними частотами[23].

Також треба зауважити, що перспективний діапазон радіопокриття 700/800 МГц (цифровий дивіденд) має суттєві недоліки. Станом на сьогодні в ньому неможливо виділити достатній ресурс для суцільного дуплексного радіоканалу шириною 2×20 МГц, що являє собою критичну вимогу для розвитку проекту LTE в цілому.

Не менш важливою «голосовою проблемою LTE» є протиріччя, які виражені в тому, що виділений для цієї технології спектр орієнтований перш за все на надання голосових послуг, в той час, як технологія LTEAll-IP орієнтована на пакетній передачі даних. Згідно зі стандартом, LTE маєдва режими дуплексу, а саме часовий (TDD) та частотний (FDD)[24]. Режим FDD має значення для двокерованого голосового трафіка, але абсолютно позбавлений сенсу для асиметричної передачі даних, при якій одна з дуплексних полос буде повністю використовуватись, а інша тільки частково. В результаті придбавши ліцензію, оператор телекомунікаційних послуг буде сплачувати за частоту, яку він не буде використовувати.

1.3.4. Недостатня спектральна ефективність і абонентська ємність LTE

Порівнюючи базові показники пропускної спроможності сучасних радіотехнологій, можливо зробити висновок, що для LTE, оперування

здійснюється піковими значеннями, також зазначені показники досягаються за рахунок серйозного погіршення завадостійкості в радіоканалі (шляхом використання модуляції CAM-64) і необхідності використання методу антен MIMO, яке в свою чергу не знайде широкого використання в реальних міських умовах.[23,24] Можна зазначити, що реальні показники швидкості передачі даних в міських мережах LTE будуть значно нижчі, а показники спектральної ефективності не будуть значно перевищувати аналогічні значення мереж попереднього покоління. Що стосується значення абонентської ємності на одну соту, то для мережі 4-го покоління даний показник буде прирівнюватись до значень мережі 3-го покоління.

1.3.5. Технологічні проблеми IP мультимедійної підсистеми (IMS)

Комплекс проблем пов’язаних з спільним розвитком LTE та IP мультимедійної підсистеми (IMS). IMS – це система надання мультимедійних послуг, яка базується на основних протоколах IP-мереж [25]. В рамках сервісу забезпечується обмін даними: відео, текстом, голосом. Основною відмінністю технології від інших систем є інтегрування в одне ціле бездротових і дротових мереж доступу. Дана технологія забезпечує зв'язок і інтелектуальне налаштування. При появі нової послуги, перетворенню піддається тільки надбудова, а мережа в загальному залишається незмінною.

Користь від такого підходу для оператора полягає в можливості надавати різноманітні послуги, підвищуючи тим самим середній прибуток від абонента. А для оператора використання IP протоколу дозволяє побудувати гнучку мережу з низькими операційними затратами.

Платформа IMS і пов’язані з нею додатки, включені у склад базових стандартів технології LTE, означає обов’язкове її розгортання при інсталяції радіомережі 4-го покоління. Тим не менш, далеко не всі мобільні оператори включають технологію IMS в силу її значних недоліків, при розгортанні мережі LTE [22]. Таким чином з’являється така ситуація коли сучасна технологія LTE

бореться з несучасною технологією IMS, тим самим обмежуючи бізнес-модель. На сьогоднішній день дана технологія продовжує активно нав'язуватись при впровадженні LTE.

1.3.6. Техніко-економічні труднощі проекту LTE

Відповідно до визначених Сектором радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку вимог до мобільних технологій 4-го покоління, технологія LTE не в повній мірі відповідає цьому статусу. За основними ознаками, 4G відносяться такі технології, а саме: WirelessMan-Advanced (IEEE 802.16m), LTE-Advanced або WiMAXRelease 2.0 остання виключно за показниками пікової пропускної спроможності (для фіксованих – 1 Гбіт/с, 100 Мбіт/с – для мобільних додатків).

Більшість проблем, базується на особливостях проекту 3G ці ж основні моменти будуть актуальними і для LTE, а саме:

1) Складність у використанні уніфікованого термінального обладнання;
2) Незавершеність стандартизації рішення передачі голосу;
3) Низька продуктивність транспортної мережі;
4) Досить складна можливість забезпечити стійкий сигнал для суцільного радіопокриття великих міст;

Досить великою проблемою є те, що термінальне обладнання LTE не є уніфікованим, а тільки розділене по певним параметрам.

Таблиця 1.2.

Категорії термінального обладнання LTE

Категорія термінального обладнання	Максимальна швидкість передачі (Мбіт/с)	Підтримка модуляції
Category 1 (LTE rel. 8/9)	10/5	Не підтрмує
Category 2 (LTE rel. 8/9)	50/25	Не підтрмує
Category 3 (LTE rel. 8/9)	100/50	Не підтрмує
Category 4 (LTE rel. 8/9)	150/50	Не підтрмує

Category 5 (LTE rel. 8/9)	300/75	Підтримує
Category 6 (LTE rel. 10)	300/50	Не підтрмує
Category 7 (LTE rel. 10)	300/150	Не підтрмує
Category 8 (LTE rel. 10)	1200/600	Підтримує

Виходячи з вищевказаних даних, для більш швидкісних релізів подальшого розвитку LTE, необхідно буде повна заміна термінального обладнання на нове. В зв'язку з цим, перспектива випуску дешевого термінального обладнання, яке одночасно підтримує всі доступні релізи LTE так і залишиться в перспективі. Також не менш важливу проблему в майбутньому відіграє питання високого енергоспоживання термінального обладнання, що стане ключовим аспектом при виборі пристрою.

На думку деяких аналітиків, купувати термінальне обладнання, яке підтримує усі типи LTE поки що зарано, оскільки більшість чипсетів на цих пристроях доволі незрілі для повної оптимізації енергоспоживання, а інтенсивна передача даних буде потребувати більшого енергоспоживання. Для цього виробники термінального обладнання будуть вимушені збільшити ємність батареї, що в свою чергу призведе до збільшення габаритів самого пристрою, а як всім відомо, у 21 столітті на ринку термінального обладнання править витонченість. Всі виробники намагаються конкурувати, створюючи більш елегантніші та витончені пристрої, що зможуть конкурувати на досить великому ринку термінального обладнання.

Що стосується незавершеності стандартизації передачі голосу, суть проблеми зводиться до того, що на даний час не існує загальноприйнятої технології передачі голосу в мережі LTE, а отже, не має сенсу виробникам виробляти термінальне обладнання, оскільки є велика ймовірність того, що вони виявиться несумісними з рішеннями LTE.

Серед основних причин запланованого провалу проекту LTE у сфері передачі голосу можна назвати масштабність інвестицій в нову голосову

інфраструктуру при зовсім неясних термінах її окупності на фоні постійного зменшення вартості тарифів на голосові послуги.

Також досить великою загрозою мобільному бізнесу є запуск нових голосових послуг типу Viber, IMessage, WhatsApp, Skype, Google, так як більшу частку прибутку для оператора надходить від голосових послуг, це майже 80% від сукупного прибутку. Вищезгадані провайдери підтримують відеозвінки, голосові виклики, активні списки контактів, обмін повідомленнями та інше.

На сьогодні оператори мобільного зв'язку мають декілька варіантів вирішення цієї проблеми, а саме:

1) VoLTE (Voice over LTE);
2) VoLGA (VoiceoverLTE з вкористанням неліцензійного мобільного доступу - UMA);
3) CSFB (Circuit Switcherd FallBack);
4) Залучення та використання технологій інших провайдерів;
5) Інтеграція з мобільними мережами CDMA, яка базується на принципах єдиного кодування голосу.

1.4. Проблеми, пов'язані з недостатньою функціональною стійкістю

На підсистеми базових станцій (BSS) негативно впливають внутрішні (відмови, збої, помилки корпоративних абонентів) і зовнішні (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища) чинники. Тому проблема забезпечення можливості безпомилкового функціонування BSS, за умови можливої дії негативних чинників, є актуальною і досі аналітично не сформульована.

Аналіз функціонування підсистем базових станцій показав, що відомі властивості складних технічних систем, такі як стійкість, надійність, живучість, відмовостійкість характеризують функціонування підсистем при впливі відмов і пошкоджень, але не дозволяють в повній мірі описати процеси функціонування в умовах значних руйнувань, впливу потоків відмов і несправностей , можливих навмисних впливів, в тому числі і терористичних.

Тому, доцільно ввести в розгляд нову властивість підсистем базових станцій - функціональну стійкість.

Під функціональною стійкістю об'єкта розуміється його властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах протидії, а також впливу потоків відмов,навмисних пошкоджень, несправностей і збоїв.

Забезпечення функціональної стійкості відбувається у три етапи:

- виявлення позаштатної ситуації;
- локалізація позаштатної ситуації;
- відновлення функціонування системи з обмеженими можливостями.

Функціональна стійкість складної технічної системи поєднує властивостінадійності, відмовостійкості, живучості і характеризує здатність об’єкта до відновлення працездатного стану за рахунок використання надмірності.

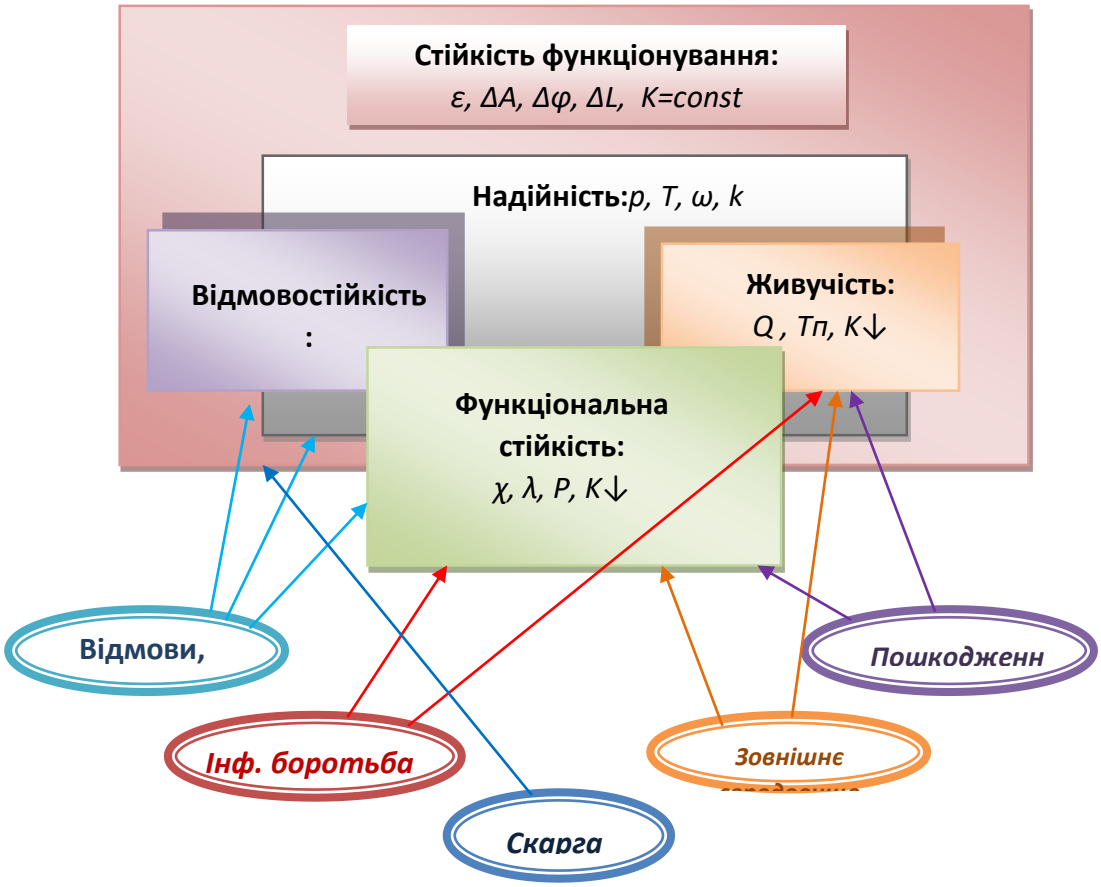


Рис. 1.5 Властивості складних технічних систем, що описують функціонування при впливі дестабілізуючих факторів

Надійність - властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування [27]. Заходи щодо підвищення надійності системи зменшують кількість відмов і несправностей, покращують показники безвідмовності, зберігання, довговічності і ремонтопридатності системи. В даному випадку під відмовою розуміється порушення працездатного стану всієї системи або окремих його елементів. Під несправністю - стан об'єкта, коли він нездатний виконувати хоча б одну із заданих функцій.

Під **живучістю** розуміється властивість системи зберігати обмежену працездатність в умовах зовнішніх впливів, які призводять до відмов її складових частин. Живучість характеризує здатність системи протистояти розвитку критичних відмов за будь-яких умов експлуатації, в тому числі не передбачених документацією.

Під **відмовостійкістю** розуміється властивість системи зберігати працездатність при наявності відмов його складових частин. Відмовостійкість закладається при проектуванні об'єкта з метою недопущення критичних відмов і забезпечення безпеки. Дана властивість забезпечується при проектуванні і конструюванні системи, переважно за рахунок резервування.

Властивість функціональної стійкості складних систем доповнює безліч відомих і стандартизованих властивостей для складних технічних систем, які володіють наступними особливостями:

- наявність безлічі елементів, розподілених на значній території, з'єднаних безліччю перехресних зв'язків;
- неможливість повного опису процесів функціонування інтегродиференціальними рівняннями;
- динамічно змінна структура і параметри системи, яка адаптується до зовнішніх умов;

- основні елементи системи побудовані з інтелектуальних функціональних блоків, що дозволяє автоматично реалізовувати процеси адаптації і реструктуризації з метою виконання основних функцій, покладенихна систему.

В кінцевому рахунку, функціональна ефективність BSS визначається тим, наскільки надійно, достовірно і якісно (в тому числі і оперативно) здійснюється нею обробка інформації. При цьому слід враховувати, що оперативна інформація має цінність протягом певного часу. Тому, якщо після порушення процесу накопичення, перетворення, обробки і передачі інформації, в ній організовується відновлення цього процесу за час, істотно менший, ніж для збереження оперативної цінності обробленої інформації, то така підсистема в цілому буде стійкою навіть при нестійкості її окремих елементів. Досягається це за рахунок спеціальної властивості BSS- структурної, апаратурної, програмної і тимчасової надмірності BSS. Забезпечується вона системою обчислювальної техніки, підключеними до неї технічними пристроями, наявністю обхідних і дублюючих трактів передачі (прийому) повідомлень, які дозволяють при порушенні окремих вузлів і пунктів зв'язку доставляти адресату циркулюючу в системі інформацію.

Таким чином, при забезпеченні функціональної стійкості підсистем базових станцій, виникає проблема визначення раціонального співвідношення між функціональною стійкістю елементів підсистем і ступенем надмірності її структури, яка, безумовно, є актуальною науковою задачею як на стадії проектування, так і на етапі експлуатації.

Передбачається, що всі заходи щодо забезпечення функціональної стійкості необхідно виконувати з урахуванням недостатнього фінансування, умов лавиноподібного наростання інформаційних потоків, скорочення часу на обробку інформації і прийняття рішень, зростання вартості втраченої або спотвореної інформації, а також подальшого ускладнення математичних моделей розрахункових завдань з обробки інформації [28, 30, 26, 29].

Ці та інші недоліки ініціювали розвиток нових BSS, що будуються за технологією створення глобальних обчислювальних мереж з комутацією пакетів

[31, 32, 33]. У той же час сучасні і проектовані BSS також мають істотні недоліки [33]:

1) низька надмірність ліній зв'язку (ЛЗ) і вузлів комутації (ВК) або її повна відсутність;

2) низька стійкість, захищеність від пошкоджень, низька надійність, обумовлені елементною базою і безнадмірністю структури;

3) відсутність ефективної системи контролю та діагностування працездатності BSS;

4) невідповідність тактико-технічних характеристик розроблюваних підсистемами базових станцій сучасним вимогам по стійкості і безперервності управління.

1.5. Методи планування та оптимізації систем LTE

На даний час дуже швидко розвиваються технології бездротового зв'язку. Оператори рухомого і фіксованого зв'язку все активніше впроваджують на своїх мережах нові технології широкосмугового бездротового доступу, що дозволяють поліпшити якість обслуговування абонентів, розширити коло послуг, що надаються і підвищити рівень доходів оператора. Однак всі ці переваги можуть виявитися втраченими без якісного автоматизованого планування і оптимізації мереж з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Для того, щоб надавати якісні послуги зв’язку , потрібно правильно організовувати цикл побудови і модернізації мережі. Цей цикл починається з планування і закінчується оптимізацією всієї мережі.

Концепція планування передбачає пошук якості роботи мережі для даної конфігурації, тоді як оптимізація передбачає пошук конфігурації, для якої оптимальна якість мережі.

Планування мереж LTE, включає наступні аспекти. По-перше, це аналіз трафіку в мережі, що дозволяє провести імітацію роботи мережі. Абонентів, розподілених по території випадковим чином (проте з урахуванням статистичного

розподілу за типами місцевості), підключають до базових станцій з урахуванням необхідної ємності. Це дозволяє оцінити завантаження кожної базової станції, а також кількість абонентів, які не обслуговуватимуться через відсутність канальної ємності на базових станціях. Для аналізу трафіку необхідно попередньо провести розрахунок радіопокриття і аналіз інтерференції мережі. По-друге, вибір оптимальних частотних параметрів мережі для мінімізації інтерференції (тобто території, що не обслуговується через внутрішні перешкод). По-третє, оптимізація мережі, в процесі якої підбираються параметри базових станцій: частоти, азимути і кути місця антен, потужність, висота підвіски. В результаті цього відбувається вибір оптимальних показників якості мережі, зокрема, зони обслуговування не менше заданої; мінімальних рівнів інтерференції; рівномірного навантаження трафіку на базові станції [34].

Планування мереж LTE має деякі відмінності від аналогічного процесу для інших технологій. Відмінності обумовлені типом багатостанційного доступу на базі OFDM, наявністю двох типів дуплексу - частотного (FDD) і часового (TDD) [34]. При плануванні мереж з часовим дуплексом доводиться шукати компроміс між радіопокриттям і ємністю мережі. Тому існують два основних варіанти планування мереж: з метою формування максимальної площі покриття або з метою забезпечення необхідної ємності.

Оптимізація - точне налаштування номінального плану комірок до реального.

В цілому, в області телекомунікацій, оптимізація - це найпоширеніший термін. Мобільні оператори хочуть надавати своїм абонентам максимально високу якість обслуговування і тому постійно прагнуть підвищити ефективність своїх мереж.

Потреба в оптимізації:

- Сприймається зниження якості мережі
  -ознаки моніторингу продуктивності мережі
  -досвід використання підключенням мережі

- Максимізація використання існуючої інфраструктури.
- Впровадження нових послуг.

У LTE використовуються різні концепції оптимізації мережі, на основі вимог по функціональності. Використання так званого балансування навантаження для мережевих операцій дають суттєвий приріст в продуктивності мережі. Це досягається шляхом підстроювання параметрів управління мережею таким чином, що перевантажені осередки можуть розподілити надлишковий трафік з сусідніми осередками, якщо такі є.

Рис 1.6. Методи оптимізації мережі

На рис. 1.6 представлено методи оптимізації мережі. Процес оптимізації полягає в настроюванні обладнання антенної системи (регулювання нахилу, азимуту та висоти антени), регулювання потужності передачі eNB, алгоритму функцій та налаштування параметрів продуктивності. Ці методи оптимізації є

загальними для всіх мобільних технологій, але кожен стандарт має власне визначення вимірювань та конкретні параметри.

Оптимізація нахилу антени - це один із важливих процесів, доступних оператору для покращення якості голосових викликів та передачі даних, доступності голосу, пропускної спроможності та спектральної ефективності. Відомо, що кут нахилу антени бездротових базових станцій впливає на покриття стільникового зв'язку та управління перешкодами в існуючих стільникових мережах. На ринках бездротових операторів з високогірною місцевістю, підвищеними швидкісними та/або неоднорідною висотою антени, правильний нахил антени має вирішальне значення для гарної та безперебійної роботи.

Правильне *вирівнювання азимуту* необхідне для того, щоб радіочастотні сигнали випромінювалися в напрямку - і отримували певну область охоплення, відому як об'єкт охоплення. Правильне азимутальне вирівнювання також необхідне для відмови від небажаних РЧ-сигналів від сусідніх секторів, які стають джерелами перешкод. Метод вирівнювання азимута використовує компас; проте цей метод є проблематичним, оскільки компас може бути відхилений кольоровими металами та радіочастотними сигналами, що знаходяться на вежах.

Регулювання потужності потрібне для того щоб збільшити ємність мережі, розширити зону радіопокриття, підвищити якість зв'язку і знизити енергоспоживання. Для досягнення перерахованих цілей, механізми регулювання потужності, як правило, домагаються максимального збільшення рівня корисного сигналу при одночасному зниженні рівня радіоперешкод.

Висота антени є основою зони покриття базової станції. Якщо висота антени збільшується, втрата траєкторії зменшується, а при зменшенні висоти антени траєкторія зростає [35]. Відносини між втратою шляху та висотою антени можна встановити за допомогою моделей, запропонованих Хата, Окамура, комітетом з електронного та комунікаційного забезпечення (ECC-33) та європейським кооперативом з науково-технічних досліджень (Cost231) [36].

Самоконфігурація це широка концепція, яка включає всебе декілька окремих функцій, які охоплюються особливими функціями SON, такими як автоматичне керування програмним забезпеченням, самотестування та автоматичне налаштування сусідів [37,38]. Алгоритм самоконфігурації повинен дбати про всі аспекти м'якої конфігурації eNB після його введення в експлуатацію та ввімкнення вперше. Вона має визначити транспортну лінію та встановити зв'язок з елементами основної мережі, завантажити та оновити відповідну версію програмного забезпечення, встановити початкові параметри конфігурації, включаючи сусідні відносини, виконати самотестування і, нарешті, встановити себе в робочий режим.

Функція оптимізації параметрів хендоверу повинна бути спрямована на зменшення кількості помилок хендоверу, а також на зменшення неефективного використання мережевих ресурсів через непотрібне перенесення[39]. Зокрема, функція оптимізації параметрів хендоверу повинна бути спрямована на зменшення кількості несправностей, пов'язаних з ним, що спричиняють деградацію у користувацькому досвіді, такі як скидання викликів, збої в радіозв'язку під час або після хендоверу та зменшення швидкості передачі даних.

Висновки до розділу 1

Мобільні технології впритул підійшли до нового етапу розвитку - мереж зв'язку 4-го покоління (4G), який диктується сучасними вимогами споживачів. Мережі зв'язку 4G характеризуються більш високою пропускною здатністю, підтримкою різних IP-протоколів, а також адаптивним керуванням частотного спектру і високою якістю обслуговування мультимедійного трафіку.

У першому розділі було детально проаналізовано архітектуру сучасних стільникових мереж, а саме 4G та 5G. Мережа 5G має кілька переваг перед мобільною мережею 4G, оскільки поточна мережева архітектура 4G повинна бути замінена більш гнучкою архітектурою мобільної мережі 5G.

Одним з ключових напрямків розвитку телекомунікацій є покращення якості послуг стільникового зв’язку, тому було проведено аналіз аварійних ситуацій операторів стільникового зв’язку, згідно з яким можна зробити висновок, що не завжди стільникові оператори надають високу якість зв’язку. Причиною цього можуть бути різні збої та порушення в мережах зв’язку стільникових операторів.

Також у цьому розділі було розглянуто технологічні проблеми мереж 4G. Основними з яких можна назвати такі: швидкість передачі даних, відсутність загальноприйнятої технології передачі голосу,недостатня спектральна ефективність і абонентська ємність LTE, проблеми IP мультимедійної підсистеми (IMS) татехніко-економічні проблеми.

Розглянуто проблеми, які пов’язані з недостатньою функціональною стійкістю та визначено основні етапи та властивості. Забезпечення функціональної стійкості необхідно виконувати з урахуванням недостатнього фінансування, умов лавиноподібного наростання інформаційних потоків, скорочення часу на обробку інформації і прийняття рішень, зростання вартості втраченої або спотвореної інформації, а також подальшого ускладнення математичних моделей розрахункових завдань з обробки інформації.

Проаналізовано методи планування та оптимізації підсистем базових станцій. Визначено, що планування мобільних мереж зв'язку вимагає великих матеріальних, трудових і тимчасових витрат. Від того, наскільки якісно воно буде виконано, безпосередньо залежить співвідношення «ефективність-витрати», яке є визначальним в умовах ринкової економіки.

В наступних розділах планується розглянути проблеми синтезу функціонально стійкої структури підсистем БС та метод її вирішення. Проаналізувати вимоги та провести оцінку структурних властивостей функціонально-стійких підсистем БС. Для проектування мережі LTE, потрібно провести вибір обладнання, розрахувати оцінку бюджета втрат та визначити необхідні зони покриття. Також планується розглянути методрозвантаження радіомережі і паралельного використання декількох каналів. Для зниження

енергоспоживання підсистем базових станцій, необхідно буде проаналізувати метод підвищення енергоефективності підсистем БСта знайти шляхи використання альтернативних джерел енергії.

Список використаних джерел

1. BigData. Большие данные – большие возможности операторов связи. URL:http://1234g.ru/novosti/bolshie-dannye-dlya-operatorov

2. LTE Radio Link Budgeting and RF Planning: LTE Encyclopedia – URL: https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning

3. Тихвинский, В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура [Текст] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. — М.: Эко-Трендз, 2010. — 284 с

4. 3GPP 25.813 Evolved Universal TerrestrialRadio Access (E-UTRA) and Evolved UniversalTerrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Radiointerface protocol aspects, Release 7, V7.1.0, 2006.

5. 3GPP TS 23.401General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access, Release 8

6. Принципы построения и функционирования сетей LTE. Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: http://1234g.ru/4g/lte/printsip-raboty-seti-lte/printsipy-postroeniya-i-funktsionirovaniya-setej-lte

7. Suyash Tripathi, Vinay Kulkarni and Alok Kuma //LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols. 2011

8. 3GPP TR 23.799. Study on Architecture for Next Generation System, Release 14.

9. 5G Reference Network Architecture [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: http://www.techplayon.com/5g-reference-network-architecture/

10. What is 5G New Radio (5G NR) - [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://5g.co.uk/guides/what-is-5g-new-radio/

11. LTE to 5G:Cellular and BroadbandInnovation//Mobile Broadband Transformation, Rysavy Research/5G Americas, August 2017

12. Ali A. Zaidi, Robert Baldemair, Hugo Tullberg, Håkan Björkegren, Lars Sundström, Jonas Medbo,Caner Kilinc and Icaro Da Silva. “Waveform and Numerology to Support 5G Services” // EricssonResearch, Sweden.

13. Сеть оператора «Киевстар» после сбоя работает в штатном режиме [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://itc.ua/news/set-operatora-kievstar-posle-sboya-rabotaet-v-shtatnom-rezhime/

14. Сеть оператора «Киевстар» после сбоя работает в штатном режиме [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: **http://news.bigmir.net/technology/730487-Kiivstar-nazvav-prichiny-zbou-y-svoii-mereji**

15. "Vodafone Україна" попереджає про тимчасові проблеми зі зв'язком [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: **https://www.rbc.ua/ukr/news/mts-ukraina-predupredil-abonentov-obryve-1456999219.html**

16. На неподконтрольной части Донецкой области проблемы со связью «Lifecell» [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу:**http://novosti.dn.ua/news/267137-na-nepodkontrolnoy-chasty-doneckoy-oblasty-problemy-so-svyazyu-lifecell**

17. MobilebroadbandwithHSPAandLTE – capacity 6 andcostaspects. Whitepaper. Nokia Siemens Networks Corporation. 2010.

18. Cisco Visual Networking Index (VNI) Global Mobile Data Traffic Forecast, 2010-2015.

19. The timing of the consumer and operator features available from HSPA and LTE. Ofcom. January 2012.

20. Kleemann N. LTE and Mobile Broadband Revolution or E-volution? Nokia Siemens Networks.

21. How developers and brands are making money in the mobile app economy. Insights and analysis from the definitive research report into mobile developers, apps and brands going mobile. Developer Economics 2011.

22. Одарченко Р.С., Полігенько О.О., Ткаліч О.П. Експериментальні дослідженя пропускної здатності мереж стандарту IEEE 802.11n / Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. – К.: НАУ, 2013. – Вип. № 4 (44).– С. 61-69

23. Р. С. Одарченко, О. О. Полігенько, Н. В. Дика, В. В. Поліщук Дослідження основних недоліків базових станцій різних поколінь стільникового зв'язку // Телекомунікаційні та інформаційні технології.– 2016. – №3. – С. 81-89

24. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А./ — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 204 с.

25. Технология IMS – преимущества и недостатки [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://youmagic.pro/blog/poleznoe/ponyatie-i-sravnenie-tehnologij-ims-telefonii-i-ip-mpls/

26. Королев А, В., Кучук Г.А., Пашне. А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. — Харьков: ХВУ, 2003. — 224 с.

27. Надійність техніки. Терміни та визначення. ДСТУ 2860-94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.

28. Сорокин В.П. Автоматизация обработки информации в АСУ. – Киев: изд. ВА ПВО СВ, 1990. – 100 с.

29. Зелигер Н.Б., Чугреев О.С., Яновский Г.Г. Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.

30. Введение в теорию живучести вычислительных систем / Додонов А.Г., Кузнецова М.Г., Горбачик Е.С.; Отв. ред. Гуляев В.А.; АН УССР. Ин-т проблем регистрации информации. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.

31. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов / Под ред. В.С, Семенихина. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.

32. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы технологии, протоколы. – С.-Пб.: Питер, 1999. – 668 с.

33. Пономаренко Л.А., Щелкунов В.И., Скляров А.Я. Инструментальные средства проектирования, имитационного моделирования и анализа компьютерных сетей. – К.: Наукова думка, 2002. – 508 с.

34. Безрук В. М., Иваненко С. А., Чеботарёва Д. В. Многокритериальная оптимизация проектных вариантов при планировании сетей LTE.//Методы построения, проектирования и планирования инфокоммуникационных систем – Харьков, Украина. –2013. – С.87-89.

35. Sheveta Sharma and prof.R.S Uppal, “RF coverage estimation of cellular mobile system”, International Journal of Engineeringand Technology vol.3 (6), 2011 – 2012.

36. H. Hata “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio resources”, IEEE Trans. on vehicular technology, VT29(3), 1980.

37. 4G Americas “Self-Optimizing_Networks-Benefits_of_SON_in_LTE”, July 2011.

38. NGMN requirement document, “NGMN Recommendations on SON and OAM Requirements”, Dec. 2008

39. 3GPP TS 32.521 Self-Orginizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Requirements , Release 10, V10.0.0., 2010.

40. Одарченко Р.С., Методи оптимізації підсистеми базових станцій, Україна, 2016.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

Більшість телекомунікаційних системє складними, що утворюють багаторівневі конструкції, причому функціонування їх не можна описати простою сумою взаємодій їх елементів. Такі соціальні, біологічні, технічні системи різних видів. Незважаючи на неоднозначність поняття «складна система», можна виділити ряд притаманних їй характерних ознак [1]: велике число взаємно пов'язаних і взаємодіючих між собою елементів; складність функції, виконуваної системою і спрямованої на досягнення заданої мети функціонування; можливість розбиття системи на підсистеми, цілі функціонування яких підпорядковані спільній меті функціонування всієї системи; управління (часто ієрархічної структури) розгалуженою інформаційною мережею і інтенсивними потоками інформації; взаємодія з зовнішнім середовищем і функціонування в умовах впливу випадкових факторів.

Таким чином, основними завданнями, які вирішуватимуться в другому розділі даної дисертаційної роботи, є наступні:

1. Визначити проблему синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій.

2. Провести вибір обладнання для проектування мережі LTE. Зокрема, необхідно з’ясувати основні етапи, переваги та недоліки даної методики. Визначити завдання побудови початкового наближення та провести оцінку бюджета втрат і зони покриття.

3. Розглянути постановку та методи синтезу функціонально стійкої структури підсистем БС за критерієм максимуму функціональної стійкості. Проаналізувати вимоги та провести оцінку структурних властивостей функціонально-стійких підсистем БС.

4. Розглянути метод вирішення задачі синтезу підсистеми БС, а саме навести побудову математичної моделі та алгоритм її вирішення.

5. Розробити схему вирішення проблеми синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій. Зокремапотрібно розглянути моделі синтезу структури BSS та їх основні властивості.

6. Обгрунтувати критерій оптимізації в загальних і приватних задачах синтезу функціонально стійких підсистем базових станцій, а саме визначити постановку задач синтезу обчислювальних мереж та їх вимоги.

7. Провести вибір і обгрунтування математичної моделі підсистеми БС. Визначити елементи підсистеми, що впливають на функціональну стійкість.

2.1. Постановка проблеми синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій

В процесі створення і вдосконалення мережі стільникового зв'язку вирішуються дві нерозривно пов'язані задачі: планування мережі (попереднє і детальне та оптимізація мережі (перепланування за результатами експлуатації)[2,3]. При вирішенні цих завдань виконуються аналогічні операції і обчислення. Крім того, процеси планування і оптимізації мереж різних стандартів також подібні.

Планування мережі полягає в оцінці структури мережі (Network Layout), визначенні місць розміщення елементів радіопідмережі (мережеві елементи), визначенні висот і місць установки антен базових станцій мережі (антени Heights) [4,5].

Оптимізація мережі передбачає аналіз даних верифікації (перевірки відповідності результатів планування параметрам існуючої мережі) і моніторингу, аналіз проблем, виявлених при експлуатації мережі (скарг 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[5]:

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

- по-друге, грунтується на результатах проведених драйв-тестів і технічному аудиті параметрів мережі в проблемних зонах обслуговування;

- по-третє, 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. 2.1.) можна розбити на два етапи:

- попереднє планування;

- детальне планування.

Рис. 2.1 - Етапи планування мережі стільникового зв'язку

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

- покриття;

- ємність;

- основні ключові параметри якості функціонування KPI, в які включена функціональна стійкість.

У загальному випадку, постановка проблеми синтезу підсистем базових станцій формулюється в такий спосіб. Відомі:

- перелік вузлів комутації (ВК) різних типів в складі BSS;
- перелік функціональних завдань кожного ВК;

- перелік базових станцій;

- параметри алгоритмів, що характеризують потребу продуктивності процесорів, каналів введення-виведення та інших ресурсів ВК, які необхідні для вирішення функціональних завдань ВК;

- об'ємно-часові характеристики вихідної, результативної і нормативно-довідкової інформації для кожного завдання, а також взаємозв'язок завдань по вхідній і вихідній інформації;

- безлічі географічних пунктів, де допускається розміщення ВК;

- вимоги до загальної ємності підсистеми БС;

- вимоги до необхідно пропускної здатності в перерахунку на одного абонента;

- вимоги до достовірності інформації та тривалості процесів її перетворення.

Таким чином, необхідно знайти оптимальне за економічним критерієм число і розміщення ВК, а також склад, взаємозв'язок і структуру технічних засобів BSS, в тому числі перелік каналів зв'язку. При цьому повинні виконуватися задані обмеження на граничні значення показників ефективності функціонування BSS, що характеризують час перетворення і достовірність інформації. В якості таких показників використовуються: середнє і 95-відсоткове значення часу реакції на запити від базових станцій [6], середній час перебування (середня затримка) пакетів в мережі [7], середній час очікування початку обслуговування запитів, ймовірність отримання відмови в обслуговуванні, ймовірність помилки в отриманій інформації і ін.

Отже, проблему синтезу оптимальної структури BSS можна записати у вигляді:

$$F = \min \sum_{j=1}^{m_Э} C_j(\boldsymbol{P}_j, \{\Theta_{ij} / i = \overline{1, m_\Theta}\}); \qquad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^{m_Э} a_{ij} \cdot \Theta_{ij} \leftrightarrow \Theta_i^*, \qquad i = \overline{1, m_\Theta}. \qquad (2.2)$$

де $C_j(\cdot)$ - функція наведених витрат на j-й структурно-функціональний елемент (БС, КК, лінія зв'язку)

$\boldsymbol{P}_j$ - вектор об'ємно-часових характеристик потоків інформації, що надходить на вхід j-го структурно-функціонального елемента;

Θ_{ij} - складова і-го показника ефективності функціонування підсистем базових станцій, що відноситься до j-го структурно-функціональним елементу;

a_{ij} - ваговий коефіцієнт, який враховує частку загального потоку повідомлень, що надходить на вхід j-го структурно-функціонального елемента, при оцінці Θ_i;

Θ_i^* - задане граничне значення показника;

$m_Э$- потужність безлічі структурно-функціональних елементів BSS;

m_Θ –потужність безлічі показників ефективності функціонування BSS;

$\leftrightarrow$ –одне з відносин виду=, <, >,≤, ≥.

Таким чином, задача синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій зводиться до мінімізації витрат на її побудову при забезпеченні мінімально допустимих обмежень по якості обслуговування абонентів.

2.2 Вибір обладнання для проектування мережі LTE

На першому етапі проектування будь-якої мережі необхідно провести змістовний вибір необхідного обладнання, що буде задовольняти представленим вимогам (обмеженням).

Замовник робіт ставить конкретне завдання на технічну реалізацію проекту, і компанія-проектувальник пропонує йому найбільш ефективне рішення (систему), що здатне забезпечити всі можливв запити. У процесі вибору технічної реалізації відбувається коригування потреб замовника шляхом проведення переговорів і узгодження всіх особливостей проектованої системи.

Запропонована методика відрізняється від звичайних техніко-економічних розрахунків тим, що на практиці Замовник робіт або користувач має свої

інформаційні потоки, які залежать від технічних можливостей системи зв'язку, кількість і якість яких впливає на дохід компанії. Через переведенням роботи у віртуальний інформаційний простір ця залежність стає все більш значущою.

Таким чином, ключовим елементом цієї методики є можливість замовнику вибирати рішення на основі аналізу власних потреб відповідно до якості обслуговування.

Методика вибору проектного рішення має наступну послідовність дій:

1. Пошук і систематизація готових рішень для побудови мережі LTE (табл. 2.1):

Таблиця 2.1

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 $k=\{k_1, k_2,\ldots,k_n\}$, за якими буде оцінюватися система (заносяться до табл. 2.2):

Таблиця 2.2

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 за наявністю/відсутністю певної необхідної характеристики і приймати рішення за ціною продукту.

Тому, враховуючи ваговий коефіцієнт, критерій інтегральної оцінки буде мати вигляд:

$k_{інт} = \sum(k_n \cdot x_n)$, де вектор $x=\{x_1, x_2,\ldots,x_n\}$ – 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. 2.3):

Таблиця 2.3

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 (заносяться до табл. 2.3);

7. Вибір оціночної шкали проводиться аналогічно третьому пункту даної методики;

8. Вибір оптимальних рішень для окремих вузлів;

9. Перевірка сумісності окремих вузлів різних виробників, за результатами якого можлива заміна на інше оптимальне рішення;

10. Порівняльний аналіз вартостей готового рішення на основі окремих вузлів.

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

2.2.1. Побудова початкового наближення мережі LTE

Таким чином, завдання побудови початкового наближення мережі LTE можна сформулювати наступним чином [8]:

• Спочатку потрібно визначити просторові параметри мережі (кількість базових станцій та розміри їх зон обслуговування) при заданій смузі частот враховуючи те, що пікові швидкості передачі даних по лінії «вниз» і лінії «вгору» максимальні, а число базових станцій в складі мережі не перевищує допустимого значення.

• Інший варіант - рішення задачі оптимізації (мінімізації або скорочення) числа БС в складі мережі при заданих значеннях пікових швидкостей передачі даних по лінії «вниз» і лінії «вгору».

Складність завдань побудови початкового наближення мережі LTE полягає в тому, що неможливо знайти прямого рішення. При побудові початкового наближення мережі з ортогональним частотним поділом каналів будемо вважати, що:

1) щільність абонентів та їх розподіл на території обслуговування мережі постійний і рівномірний.

2) розміри всіх сот мережі однакові.

3) морфоструктура місцевості однотипна (міська забудова, приміський район, сільська або відкрита місцевість, тощо).

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

Виходячи з даних обмежень, мережа має регулярну однорідну структуру, (вузли eNB розміщені між собою на однаковій відстані), технічні характеристики і кількість приймально-передавачів, а також висоти підвісу антен, азимути і кути нахилу однакові для всіх eNB.

Для побудови мережі початкового наближення потрібно мати досить великий набір вихідних даних. Достовірність даних може суттєво вплинути на вірність 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, вихідними даними до первинного планування мережі LTE будуть наступні параметри[8]:

Таблиця 2.4.

Вихідні 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 вищче p_{bit}
5.	Необхідна пропускна здатність на одного абонента	Мбіт/с
6.	Кількість абонентів	Од.

2.2.2. Методика оцінки бюджета втрат і зони покриття

Максимально допустимі втрати при поширенні в каналі рівні:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fid} - IM - L_{slow} - L_{мет} - L_{ф}, \quad \ldots\ldots(2.3)$$

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.

$L_{Ф}$ – врати 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.

Таким чином, $L_{мет}$ визначається наступною формулою:

$$L_{мет} = L_{тум} + L_{гідромет} + L_{аг}, \qquad \ldots\ldots\ldots (2.4)$$

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

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

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

Математичний апарат для розрахунку $L_{тум}$, $L_{гідромет}$ та $L_{аг}$наступний.

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

$$L_{Ã} = \left(\gamma_{O_2} + \gamma_{H_20}\right) \cdot l, \quad \ldots\ldots\ldots (2.5)$$

де γ_{O_2}, γ_{H_20} – погонні втрати (дБ/км) у кисні та водяних парах атмосфери при температурі повітря 15 ^{0}С та відносній вологості 100 % (абсолютна вологість становить 13,4 г/м^3):

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

$$\gamma_{H_20} = \left(0{,}078 + \frac{3{,}6}{(f-22{,}2)^2 + 8{,}5} + \frac{10{,}6}{(f-183{,}3)^2 + 9} + \frac{8{,}9}{(f-325{,}4)^2 + 26{,}3}\right) f^2 \cdot 13{,}4 \cdot 10^{-4},$$

де f - робоча частота, ГГц.

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

Запас по інтерференції IM (дБ) визначається наступним чином:

$$M = P_{ПР} - P_{ПОР}\left(10^{-3}\right), \text{ ……. (2.6)}$$

Тоді, чутливість приймача P_{RX} можна визначити наступним чином:

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

де $\left(E_b / N_0\right)$ - 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 = 1,23×10^{-23} Дж/к – стала Больцмана,

T- температура в Кельвінах (абсолютна температура).

Таким чином, виразмаксимально допустимих втрат можна ще представити у вигляді:

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

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 [9]

$$BER_0(\eta) = 0.5[1 - \Phi(\sqrt{a\eta})], \quad \text{……. (2.7)}$$

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

де α=2 и α=1 для бінарної і квадратурної фазових модуляцій, відповідно.

ВСШ в *i*-му власному підканалі можна розрахувати за формулою:

$$\eta_i = \beta_i \rho_0 \lambda_i .$$

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

$$BER_i = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\int_0^{\infty} f_i(\lambda)\Phi(\sqrt{\rho_i \lambda})d\lambda \qquad \text{…… (2.8)}$$

Також, потрібно врахувати, що імовірність бітової помилки P_b для BPSK та QPSK визначається виразом [9]

$$P_b = Q\left(\sqrt{2\gamma_b}\right), \qquad \text{……. (2.9)}$$

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 [10];

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: [9]

$$BER = \frac{2 \cdot (1 - L^{-1})}{\log_2(L)} \cdot Q\left[\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(L)}{L^2 - 1} \cdot \frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right] \qquad (2.10)$$

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

Підставивши сюди вирази (2.9) - (2.10) і провівши необхідні обчислення, в результаті для імовірності бітової помилки в сильному (першому) і слабкому (другому) власних каналах MIMO - системи з довільним числом *M* передавальних антен будемо мати наступні графічні залежності, отримані під час моделювання (рис. 2.2 та рис. 2.3).

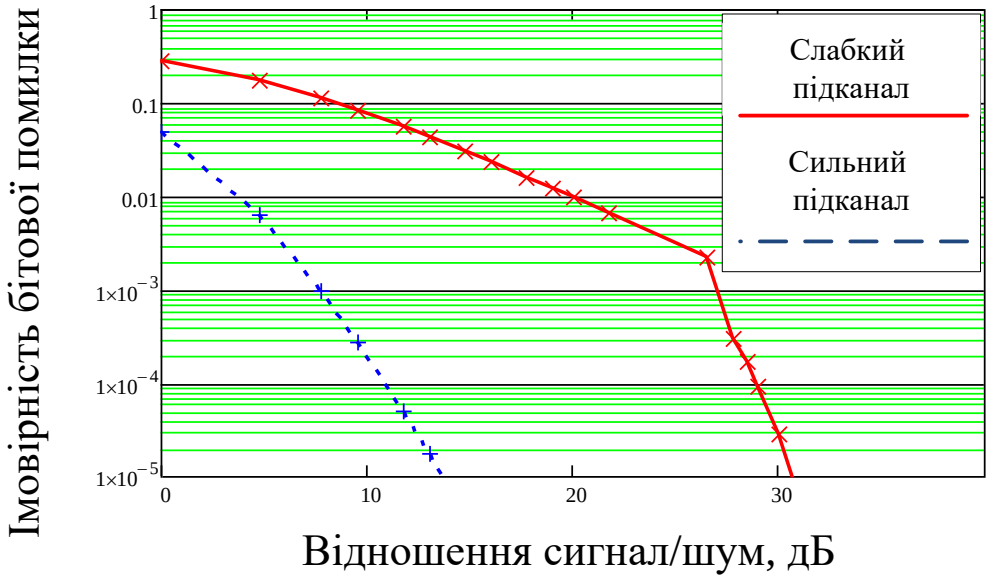
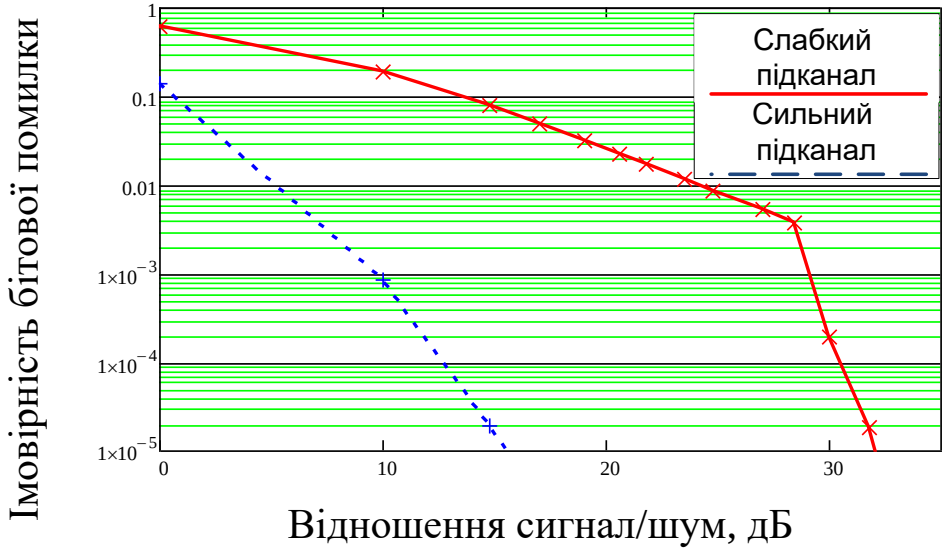
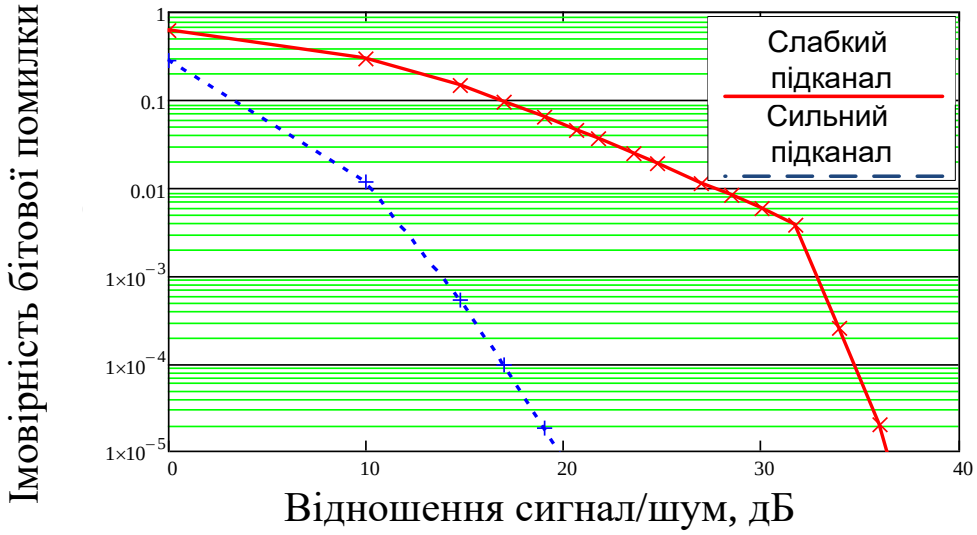


Рис. 2.2 Логарифмічна залежність імовірності бітової помилки від дношення сигнал/шум в слабкому та сильному власних підканалах для модуляції QPSK



(а)



(б)

Рис. 2.3 Логарифмічна залежність імовірності бітової помилки від відношення игнал/шум в слабкому та сильному власних підканалах для модуляції QAM-16 (а) та QAM-64 (б)

Беручи до уваги результати проведених досліджень для оцінки величини L на трасі розповсюдження радіохвиль, можна розробити ряд рекомендацій щодо використання моделей розповсюдження радіохвиль для різних діапазонів частот (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Рекомендації щодо використання емпіричних моделей розповсюдження радіохвиль для різних діапазонів частот

Частотний діапазон	**Технологія**	**Рекомендована модель розповсюдження радіохвиль**
До 2 ГГц	LTE, WiMAX, GSM, UMTS,тощо	Модель Хата
2,3 ГГц; 2,5 ГГц; 2,6 ГГц	LTE, WiMAX	Модель Хата Cost 231

3,5 ГГц	LTE, WiMAX	SUI (для умов LOS) та Ericsson (для умов NLOS)
5 ГГц; 5,8 ГГц	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:

<u>До 2 ГГц (за допомогою моделі Хата-Окамури):</u>

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

де h_b = (30–200) – висота антени базової станції, м; h_m = (1–10) – висота антени мобільної станції, м; d = (1–20) – відстань між антеною базової станції й антеною мобільної станції, км; f = (150–1500) – основна частота, МГц. Елемент $\alpha(h_m)$– коефіцієнт виправлення висоти, що залежить від навколишнього середовища. Він дорівнює нулю для $h_m = 0$. Коефіцієнт K використовується як виправлення для формул сільської місцевості, передмістя й відкритих зон.

- **<u>2,3 ГГц; 2,5 ГГц; 2,6 ГГц (за допомогою моделі *Модель Хата Cost - 231*)</u>**

$\lg(d) = (L - 46{,}3 + 33{,}9\lg(f) - 13{,}82\lg(h_b) - a(h_m) - C_m)/ (44{,}9 - 6{,}55\lg(h_b))$

де *Cm* – затухання (*Cm* = 0 дБ – для міста середніх та малих розмірів; *Cm* = =3 дБ – для центру великого міста);

$a(h_m) = 3{,}20(\lg(11{,}75h_r))^2 - 4{,}79$ – в межах міської забудови;

$a(h_m) = (1{,}11\lg(f) - 0{,}7)h_r - (1{,}5\lg f - 0{,}8)$ – в межах передмістя або на відкритій місцевості.

$$L_{rqo} = L_u - 4{,}78(\lg(f))^2 + 18{,}33\lg(f) - 35{,}94$$

$$L_{ro} = L_u - 4{,}78(\lg(f))^2 + 18{,}33\lg(f) - 40{,}94$$

- **<u>3,5 ГГц (набазі *моделі SUI (Stanford University Interim))*</u>**

$\lg(d/d_0) = (L - (A + X_f + X_h + s))/ 10\gamma,$ 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:

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

деλ – 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 2.6.

Таблиця 2.6

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

$$X_f=6\lg(f/2000)\ ,$$

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

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

де f – це частота в МГц;

h_r – висота приймаючої антени в метрах.

- **5 ГГц; 5,8 ГГц (на базі моделі Ericsson)**

$\lg(d)= L – (a_0+ a_2\lg(h_b)+ 3{,}2(\lg(11{,}75h_r)^2)+g(f))/(a_1+ a_3\lg(h_b))$

де$g(f)=44{,}49\lg(f)-4{,}78(\lg(f))^2$;

f– частота;

h_b – висота передавальної антени;

h_r – висота приймаючої антени.

Значення параметрів a представлені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Значення параметрів для моделі Ericsson

Середовище	a_0	a_1	a_2	a_3
1	2	3	4	5
Місто	36,2	30,2	12,0	0,1
Передмістя	43,20	68,93	12,0	0,1
Відкрита місцевість	45,95	100,6	12,0	0,1

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

- при смузі частот каналу 10 МГц допустимі втрати знаходяться в межах 125,8 – 148 дБ, тому доцільно обмежувати кількість ресурсних блоків до 4, що виділяються абонентській станції;

- при ширині смуги частот каналу 15 МГц допустимі втрати знаходяться в межах 121,8 – 144,2 дБ , тому доцільно обмежувати кількість ресурсних блоків до 8, що виділяються абонентській станції;

- при ширині смуги частот каналу 20 МГц допустимі втрати знаходяться в межах 117,8 – 139,9 дБ, томудоцільно обмежувати кількість ресурсних блоків до 16, що виділяються абонентської станції.

При побудові початкового наближення LTE мереж в діапазоні 2300 – 2400 МГц доцільно застосовувати модель MCE-R P.1546 «Метод прогнозування для трас зв'язку» пункту із зоною «для наземних служб діапазоні частот від 30 МГц до 3000 МГц», яка містить:

- криві розповсюдження і відповідні таблиці в електронному вигляді;

- для частот і висот підвісу антен, відмінних від наведених, напруженість поля обчислюється методом інтерполяції за наведеними формулами, що зазначені в рекомендації;

- для міських умов вводяться відповідні поправки.

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 ½ – 1.8, 1.6 і 1.45 км

- при модуляції 64QAM ¾ – 1, 0.8 та 0.7 км

Відповідні модуляційно-кодуючі схеми вибираються виходячи з необхідної якості послуги.

2. При збільшенні смуги частот з 10 до 20 МГц площа зони покриття базових станцій LTE зменшується:

- при модуляції QPSK 1/3 з 28 до 15 кв.км
- при модуляції 16QAM ½ з 8 до 5 кв.км
- при модуляції 64QAM ¾ з 2.6 до 1.3 кв.км

Модуляційно-кодуючі схеми вибираються виходячи з необхідної якості послуги.

Оцінимо залежність дальності зв’язку від частоти при різних видах забудови (рис. 2.4).

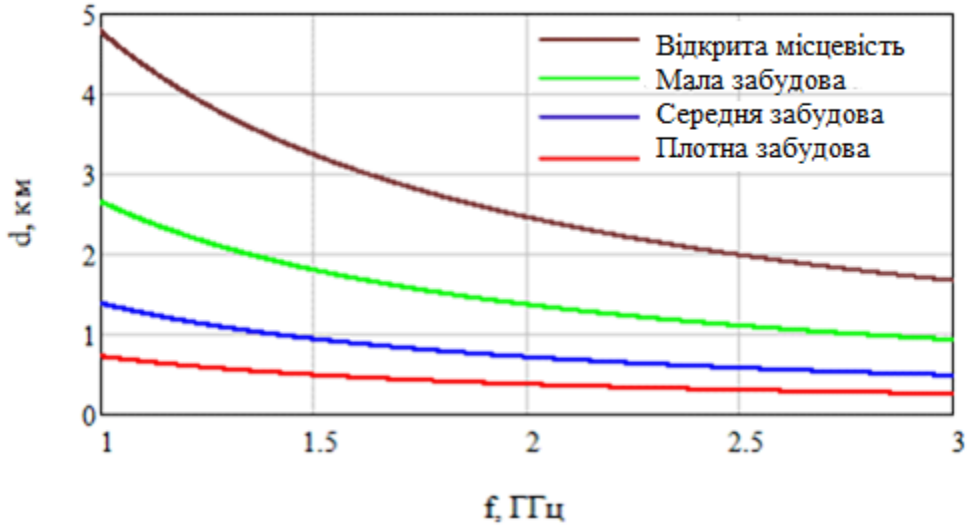


Рис.2.4 Залежність дальності зв’язку від частоти для різних типів забудови

2.3 Формалізована постановка синтезу функціонально стійкої структури BSS.

Як вже було зазначено в розділі 1, підситема БС складається зсукупності вузлів базових станцій eNodeB (E-UTRAN NodeB), в яких об'єднані функції передавача і контролера.

Таким чином, єN вузлів комутації підсистеми базових станцій, розташування яких задано просторовими координатами (покази GPS). Між базовими станціями здійснюється обмін інформацією як сигнальною так і користувальницькою згідно з матрицею інтенсивностей $H=||h_{ij}||$ розміру NxN, де h_{ij}–сумарний обсяг інформації, що передається від однієї базової станції - i до іншої базової станції - j в одиницю часу, i = 1, ..., N, j = 1, ..., N, i≠j. Задані обмеження.

Припустимо, що відома функція оцінки вартості BSS- B, і визначені допустимі витрати на її створення і експлуатацію $B_{доп}$. Задані також необхідні ймовірності зв'язності $P_{необх}$ для кожної пари вузлів комутації. Таким чином, задача побудови оптимальної структури підсистеми БС буде сформульована

наступним чином. Необхідно визначити структуру підсистеми базових станцій, яка володіє максимальним рівнем функціональної стійкості F_{bss}, а також інші параметри функціонування системи мають задовольняти визначеним обмеженням по пропускній здатності, кількості абонентів, яких необхідно обслуговувати тощо. Все залежить від імовірності зв'язності Pij, при заданих обмеженнях на витрати для створення і експлуатації

Таким чином, математична модель задачі виглядає наступним чином:

$$F_{bss} = f(P_{ij}) \longrightarrow \max,\ i, j = 1,..., \mathrm{N}, \mathrm{i} \neq \mathrm{j}; \quad \text{….. (2.11)}$$

$$B = \sum_i \sum_j B_{ij}(\mathrm{l}_{ij}, \rho_{ij}, \mathrm{h}_{ij}) \le B_{доп} \quad \text{……. (2.12)}$$

$$\forall_{\pi ij}\ P_{ij} \ge P_{необх} \quad (2.13)$$

$$\varphi_{ij} \le \rho_{ij} \quad (2.14)$$

$$\tau_{сер} \le T_{\max} \quad (2.15)$$

де N - число вузлів комутації, що синтезується BSS. У загальному випадку N = var. У нашому випадку ця кількість визначається на попередньому кроці.

F_{bss}– максимізуючий функціонал якості;

Pij - ймовірність зв'язності між парою (i, j) базових станцій мережі;

l_{ij} - довжина лінії зв'язку між базовими станціями (i, j);

$\tau_{сер}$ - середній час затримки повідомлення, що пересилається від однієї базової станції до іншої.

ρ_{ij} – пропускна здатність

φ_{ij} - обсяг потоку інформації, що передаєтьсяв каналі зв’язку

Вираз (2.11) описує критерій оптимізації: максимум функціональної стійкості структури BSS. В якості показника функціональної стійкості вибирається узагальнений показник, що характеризує зв'язн iEnode в мережі (вершинграфа) ізалежитьвідімовірностізв’язностіміжкожноюпароюбазових станцій Pij. Вирази (2.12) - (2.15) описують обмеження на параметри мережі для вирішення оптимізаційної задачі.

Умова (2.11) означає, що приведені сумарні витрати на підсистему базових станцій з урахуванням довжини каналів, їх пропускної спроможності і обсягів переданої інформації не повинні перевищувати допустимої величини. Умова (2.13) визначає для всіх маршрутів π_{ij} значення ймовірності зв'язності P_{ij}. Умова (2.14) для кожного каналу зв'язку з пропускною спроможністю ρ_{ij} обмежує обсяг потоку інформації, що передається φ_{ij}. Умова (2.15) визначає середній час затримки повідомлення $\tau_{сер}$ в системі.

Таким чином, після рішення задачі оптимізації буде знайдена розподілена структура BSS, що складається з N вузлів комутації (список суміжності ребер графа структури BSS), яка буде задовольняти критерій оптимізації (2.11) і обмеженням (2.12) - (2.15).

Методологія побудови функціонально-стійких підсистем базових станцій являє собою сукупність методичних підходів, математичних моделей, методів і методик, що дозволяють реалізувати принципи функціональної стійкості в BSS (рис. 2.5).

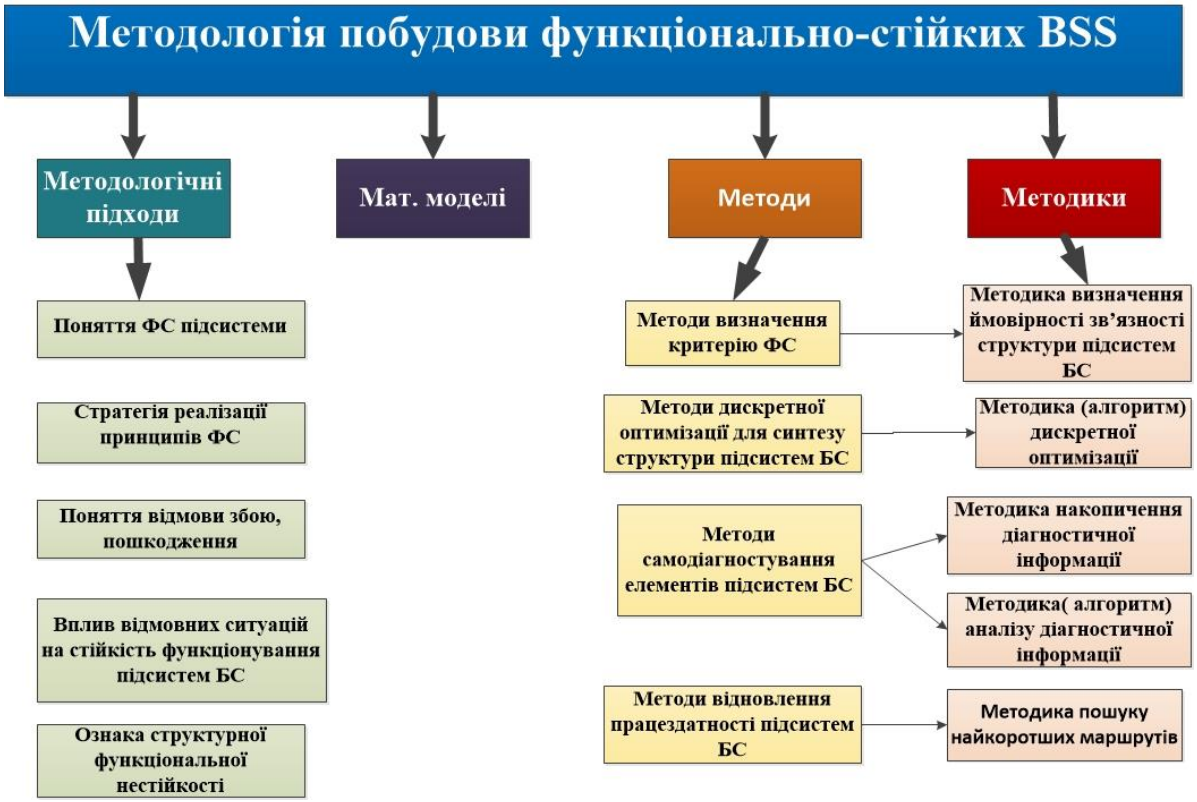


Рис. 2.5 Методологія побудови функціонально стійких підсистем БС

Вирішенню завдання забезпечення стійкості функціонування складних систем присвячений ряд наукових робіт [48,126,36,88]. Однак, основна увага в них приділяється вирішенню часткових завдань, а саме - побудови резервованих інформаційно-керуючих систем, відмовостійких обчислювальних систем, адаптивних систем управління.

В роботі [11] вперше введене поняття функціональної стійкості складних динамічних об'єктів, які можуть описуватися системою диференціальних рівнянь. Запропонований підхід базується на принципах комплексного забезпечення спостережливості, керованості, ідентифікованості динамічних об'єктів. Однак для складних організаційних систем даний апарат неприйнятний. У теорії надійності [12] визначення показників надійності спирається, в основному, на приведення структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і паралельних з'єднань модифікованих елементів. Це також не прийнятно для складних організаційних систем з великою безліччю перехресних зв'язків (постійних і випадкових) і взаємовпливом станів окремих елементів на інші елементи, тобто систем з випадковою структурою і зв'язками.

Для підсистеми БС приймаємо, що система повинна виконувати дві основні функції:

- обробку, зберігання, відображення інформації;
- передачу інформації між вузлами комутації.

Звідси випливає основна вимога до функціонально стійких підсистем базових станцій:

$$\forall\, v_i \in V \quad \Leftarrow \quad \omega_i(\tau) = 1, \quad \tau \in [0, t), \tag{2.16}$$

де V = {vi} - безліч ВК BSS;

ω (τ) - бульова функція, що приймає значення 1, якщо ВК знаходиться в працездатному стані і 0 - в іншому випадку;

τ, t - поточний час експлуатації.

1. Забезпечити передачу інформації між КК за основними або резервним маршрутами:

$$\forall v_i, v_j \quad \Leftarrow \quad \exists v_j \in \Gamma_i, \qquad i, j = 1,2,...,n, \tag{2.17}$$

де Γ_i - безліч досяжних вершин графа з вершини vi;

n - число ВК в BSS.

Якість виконання основних функцій визначається наступними числовими показниками:

ймовірністю рішення і-того завдання за час, що не перевищує задане:

$$P\{t(q_{ji}) \le t_{ЗАД\ i}\}, \qquad q_{ji} \in Q_j, \quad Q_j = \{q_{j1}, q_{j2},,...,q_{jm}\}, \tag{2.18}$$

де Qj - безліч завдань, що вирішуються в j-м ВК;

qji - і-та завдання, яке вирішується j-м КК;

t (qji) - час виконання завдання qji.

- пропускною спроможністю σij каналу зв'язку між ВК vi і vj.

При оцінці структурних властивостей функціонально-стійких BSS приймемо, що пропускна здатність σij задовольняє вимогам і не знижує якості виконання завдань в моменти перевантаження системи.

Аналіз функціональної стійкості підсистем базових станцій доцільно здійснити за такими числовими показниками:

- ступеня вершинної зв'язності χ (G);

- ступеня реберної зв'язності λ (G);

- ймовірності зв'язності структури, i, j = 1, ..., n.

За знайденими показниками можна характеризувати функціональну стійкість (ФС) підсистем базових станцій, запас ФС, ступінь задоволення заданим вимогам по функціональній стійкості, число відмов ліній зв'язку (ЛЗ) або вузлів комутації (ВК), яке може бути парирувано за рахунок введення структурної надлишковості. Існуючі методи визначення зв'язності графів громіздкі, мають підвищену обчислювальну трудомісткість і вирішуються в основному перебираючими методами [12,13,14,15].

Виходячи з цього, останнім часом набули широкого поширення наближені методи оцінки різних інваріантів графів [16,17,18]. Щоб уникнути рішення NP-важких завдань при визначенні точного значення імовірності зв'язності, широкого поширення набули оцінки Езар-Прошана [18], Литвака-Ушакова [17] і Поліського [19]. Дослідження цих та інших методів показали, що для складних розгалужених структур підсистем доцільно розробити більш прості, з точки зору обчислювальної трудомісткості, методи, які будуть придатні для вирішення завдання синтезу структури за критерієм максимуму функціональної стійкості системи.

2.4. Метод вирішення задачі синтезу підсистеми БС. Розміщення комутаторів-концентраторів в одноярусною АЦСПД

Математична модель. Введемо позначення $X = \overline{1,n}$ - множина вузлів мережі зв'язку; X_1=X\ 1 –множина джерел інформації в мережі;a_x - кількість інформації, що передається (мається на увазі, що на гілках мережі використовуються дуплексні канали зв'язку, а обсяг інформації, одержуваної абонентом з ВЦ не перевищує обсягу, переданого до ВЦ) у ВЦ з вузла $x \in X_1$; Y – підмножина пунктів, в яких допускається розміщення КК $(1 \in Y \subseteq X)$; Z_x-підмножина КК $y \in Y$, які може обслуговувати абонент $x \in X_1$; C_{xy} – витрати на підключення абонента до КК y; $q_{\max}$ - максимально-допустиме число КК; G(a) – функція витрат на КК в залежності відсумарного обсягу інформації a, що надходить в КК для передачі в ВЦ [$G(a) = 0$, якщо $a \le 0$; $G(a) > 0$, якщо $a > 0$]; $\overline{G(a)} = G_0 + ba (G_0 = \lim\limits_{\Delta \to 0} G(0 + \Delta)$ при $\Delta > 0)$; b>0 максимальне число таке, що $\overline{G}(a) \le G(a)$, якщо $0 \le a \le a_{\max}$; $B_y(a)$ – витрати на канали зв'язку між КК y і ВЦ $\left[B_y(a) = 0, \text{якщо } a \le 0; B_y(a) > 0, \text{якщо } a > 0 \right]$.

Змінні задачі:

$$\omega_{xy} = \begin{cases} 1, \text{якщо абонент } x \text{ підключений до КК } y; \\ 0 - \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Математичне формулювання завдання [20]:

a) кожен абонент $x \in X$ підключається до одного і тільки одного КК: $\sum_y \omega_{xy} = 1,\ x \in X_1;$

b) якщо в пункті $x \in Y$ встановлений КК, то цей пункт підключається до даного КК: $\omega_{xy} + \omega_{xy'} \le 1,\ x \in X\ ;\ y \in Y; y' \in Y; y \ne y';$

c) критерій оптимізації $F = \min\left[\sum_y \sum_x \omega_{xy} C_{xy} + \sum_y G(\mathrm{A}_y^1) + \sum_y B(A_y^1)\right]$, де $A_y^1 = \sum_x \omega_{xy} a_{x.}$.

Алгоритм покоординатної оптимізації. Для подальшого викладення будуть потрібні наступні позначення[21]: q – число КК ($1 \le k \le q_{\max}$) ; Y_y^q - околиця пункту при числі КК, рівному $q(\mathrm{Y}_y^q \subseteq Y; y \in \mathrm{Y}_y^q; Y_1^q = \varnothing)$;

$Y_q^* = \left\{y_1^*, y_2^*, ..., \mathrm{y}_k^*, ..., y_q^*\right)$ - безліч пунктів $y \in Y$, яке визначає початкове розміщення КК ($Y_q^* \in Y$); $\tilde{Y} = \left\{\mathrm{y}_1, \mathrm{y}_2, ..., y_k ..., y_q\right\}$ поточна множина пунктів, в яких розміщені КК ($\tilde{Y}_q \subset Y; \mathrm{Y}_1 \equiv 1$); F - поточне значення функції цілі ; F^* - оптимальне значення функції цілі.

Алгоритм:

1. $q{:}\ = 0,\ F^*{:} = \infty,\ \mathcal{W}{:}\ = \emptyset,\ U{:} = \emptyset,$

2. $q{:} = q + 1,\ k{:} = 1,\ l{:} =\ 0,\ F{:} = \infty$

3. Перевірити умови $q \lessgtr q_{max}$; якщо $q > q_{max}$, перейти до п. 12.

4. $\tilde{Y}_q \coloneqq Y_q^*$. Розмістити КК пунктах з множини $\tilde{Y}_q$, прикріплюючи кожен пункт $x \in X$ до одного і тільки одному КК $y \in Y_q$ по критерію мінімум C_{xy}.

Обчислити $F, \tilde{F}{:} = F$.

5. $l \coloneqq l + 1$. Перевірити умову $k \le q$:

а) якщо $k \le q$, $k \coloneqq k + 1$ і перейти до п.6.

б) якщо $k > q$, $k := 1$ і перейти до п.6.

6. Перевірити умову $l \le q$; якщо $l = q$, перейти до п.11.

7. $U := Y_k^q \setminus \tilde{Y}_q$.

8. Перевірити умову $U = \varnothing$; якщо $U = \varnothing$ - перейти до п.5.

9. Вибрати $Y' \in U, U := U \setminus y'$. Перемістити КК з номером k (розміщений в пункті $y_k \in \tilde{Y}_q$) в пункт y', закріпити все $x \in X$ за КК аналогічно п.4 і обчислити F.

10. Перевірити умову $F \lessgtr \tilde{F}$.

а) якщо $F \ge \tilde{F}$ повернути КК з номером k до пункту y_k і перейти в п. 8;

b) якщо, $F \langle \tilde{F}, \tilde{F} := F$, $y_k := y', l := 0$ перейти до п. 8

11. Перевірити умову $F \lessgtr F^*$:

а) якщо $\tilde{F} < F^*, F^* := \tilde{F}$, $\mathcal{W} := \tilde{Y}_q$ і перейти до п.2.

b) якщо $\tilde{F} \ge F^*$, перейти до п.2.

12. Кінець обчислень. Знайдено оптимальне значення функціїцілі F^* і відповідні розміщення КК – множину $\mathcal{W}$.

Таблиця 2.8

n	Час рахунку, хв	$F_{рад}$	$F_{опт}$	ΔF	$\frac{\Delta F}{F_{рад}}$,%
13	2,5	601	542	59	9,7
19	3,5	751	701	50	6,6
22	4,2	1253	1191	62	4,9
25	4,5	1739	1675	64	3,6

В таблиці 2.8 наведені результати рішення на ЕОМ декількох завдань. Для передачі інформації були обрані тільки телефонні канали зв'язку. В результаті отримана економія витрат у розмірі 4-10% в порівнянні з радіальною структурою. Модифікація реалізованого алгоритму, в якій вибирається тип каналу для кожного кінцевого пункту в залежності від обсягу інформації, що передається між кінцевими пунктами і обчислювальним центром, дозволяє отримати економію витрат близько 10-15%[20, 21].

Застосування методу "гілок і границь" для розміщення КК. Для організації розгалужень використовуємо дві стратегії S_1 і S_2. На основі S_1 розглядаються варіанти розміщення КК у підмножині Y. Стратегія S_2 застосовується для зміни прикріплення абонентів x до КК. При використанні стратегії S_1, пункти $y \in Y$ упорядковуються таким чином, що

$$a_y(k) \geq a_y(l); k < l; y(k), y(l) \in \overline{1, n_1}; n_1 = |Y \ \ |$$

Кореневу вершину будемо мати розташовувати на нульовому рівні. На r-му рівні $(1 \leq r \leq n_1)$ розташовуються вершини, для яких встановлюється або забороняється розміщення КК в пункті y_r. При переході на $(r+1)-й$ рівень з висячої вершини проводяться дві дуги. Одна з них встановлює розміщення КК в пункті y_{r+1}, друга - забороняє розміщення КК в цьому пункті. Кожній вершині на першому етапі розгалужень відповідає: підмножина Y_1 пунктів, в яких вже розміщені КК; підмножина Y_2 пунктів, в яких розміщення КК заборонено; підмножина Y_3 пунктів, в яких КК або можуть бути встановлені або ні. Виконуються співвідношення: $Y_i \subseteq Y, i = 1,2,3;\ Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 = Y$; $Y_i \cap Y_j = \varnothing$; $i \neq j$; $i, j = 1,2,3.$ Розгалуження за допомогою стратегії S_2 виконуються при заданих поточних підмножинах $Y_1, Y_2.$ На другому етапі пункти $x \in X$ упорядковуються по спаданню a_x. При переході до наступного, m-го рівню другого етапу $(1 \leq m \leq n)$ розглядається $m-й$ по порядку пункт $x(m) \in X$. З висячої вершини

(m−1)−го рівня на $m-$й рівень проводиться $|Y_1 \cap Z_{x(m)}|$ дуг. Кожній дузі відповідає прикріплення $m-$го абонента до одного з КК $y(1), y(2), ..., \in Y_1 \cap Z_{x(m)}$. Кожну вершину другого етапу розгалужень можна порівняти з підмножиною X_1 пунктів $x \in X$, вже прикріплених до КК,і з відповідною підмножиною $\mathcal{W}_1$ змінних ω_{xy}, таких, що $\omega_{xy} = 1$.

Якщо для деякої вершини першого етапу не виконуються співвідношення

$$X = \bigcup_{y \in (Y \setminus Y_2)} X_y,$$

то ця вершина є кінцевою. Перший етап розгалужень припиняється, якщо $Y_1 \bigcup Y_2 = Y$ або $Y_3 = \varnothing$. Нехай для деякої вершини першого етапу розгалужень фіксовані Y_1, Y_2, Y_3 і для деякого $x \in X$ виконується співвідношення:

$$x \notin \bigcup_{y \in Y_1} X_y; \quad |Z_x \bigcap Y_3| = 1.$$

Тоді для цієї вершини КК повинен розташовуватися також в пункті $y = Z_x \bigcap Y_3$ і, отже, $Y_1 := Y_1 \bigcup y; Y_3 := Y_3 \setminus y$, а абонент x можна прикріпити тільки до КК y. На другому етапі вершина є кінцевою, коли $X_1 = X$. Для цієї вершини значення границі обчислюється безпосередньо за виразом функціоналу F.

Опишемо порядок обчислення границь. Спочатку розглянемо перший етап розгалужень. Нехай розгалуження продовжуються з вершини α, що розташована на $(r-1)$-му рівні. На r-му рівні утворюються дві нові вершини β і γ.

Для вершини β:

$$Y_1^\beta = Y_1^\alpha \bigcup y_r; \quad Y_2^\beta = Y_2^\alpha; \quad Y_3^\beta = Y_3^\alpha \setminus y_r.$$

Аналогічно для вершини γ:

$$Y_2^\gamma = Y_2^\alpha \bigcup y_r; \; Y_3^\gamma = Y_3^\alpha \setminus y_r.$$

Границі f_β, f_γ для вершин β, γ обчислюються однаковим способом. Тому наведемо вираз лише для f_β (індекси β, γ у підмножин Y далі опущені):

$$f_\beta = \sum_{y\in Y_1}\sum_{x\in X_y^*} C_{xy} + \sum_{y\in Y_1} G(A_y^*) + \sum_{y\in Y_1} g_y \sum_{x\in X_y^*} \rho_x^y + \sum_{x\in X^* y\in Y_x^*} \min(C_{xy}^1 + k_y G(0)/\mathrm{n}_y + g_y\rho_x^y),$$

де

$$X_y^* = y \bigcup X_y^1;\ X_y^1 = \{x / x\in X; Z_x \bigcap (Y_1 \bigcup Y_3) = y\};$$

$$A_y^* = \sum_{x\in X_y^*} a_x; \quad X^* = X \setminus (\bigcup_{y\in Y_1} X_1^y \bigcup Y_1);$$

g_y - мінімальна вартість каналу зв'язку від КК до ВЦ (визначається значенням $\sum_{x\in X_y} a_x$);

ρ_x^y – число каналів зв'язку (не обов'язково ціле), необхідне для передачі інформації пункту x з КК у ВЦ:

$$Y_x^* = (Y_1 \bigcup Y_3) \bigcap Z_x;\ C_{xy}^1 = C_{xy} + ba_x;$$

$$k_y = \begin{cases} 0, y\in Y_1; \\ 1, y\in Y_3; \end{cases} \rho_x^y = \left(1 \Big/ \sum_{x'\in X_y} a_{x'} \right) a_x N_y;$$

N_y - число каналів зв'язку від КК y до ВЦ при підключенні до цього КК абонентів $x\in X_y$.

Значення межі для будь-якої вершини другого етапу розгалужень розраховується за формулою:

$$f_\beta^{(1)} = \sum_{\omega_{xy}\in W_1} C_{xy} + \sum_{y\in Y_1} G(A_y^*) + \sum_{y\in Y_1} g_y \sum_{x\in X_y^*} \rho_x^y + \sum_{x\in X^*} \min_{y\in Y_1}(C_{xy}^1 + g_y\rho_x^y),$$

де $A_y^* = \sum_{x\in X_{1y}} a_x; \quad X_{1y} = \{x / \omega_{xy} = 1\}; \quad X_y^* = y \bigcup X_{1y}; \quad X^* = X \setminus \bigcup_{y\in Y_1} X_{1y};$

інші позначення такі ж, що і у виразі для f_β .

2.5. Розробка схеми вирішення проблеми синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій

Розглянемо методичну схему, в якій використовується декомпозиція загальної проблеми на сукупність взаємопов'язаних окремих завдань.

Сукупність приватних завдань описується ієрархічною чотирирівневою системою моделей (рис. 2.6.). Рішення загальної проблеми досягається ітеративним шляхом в результаті послідовного уточнення структурних параметрів BSS на основі розрахунків за вказаними моделями.

В основу розробки ієрархічної системи моделей покладена декомпозиція кожного з обмежень на складові, які стосуються відповідних структурно-функціональних елементів підсистеми БС. Декомпозиція обмежень здійснюється експертним шляхом на етапі ескізного опрацювання обмеженого числа варіантів проектованої мережі і зіставлення параметрів її елементів з існуючими аналогами.

Моделі першого рівня призначені для дослідження структур і процесів функціонування технічних комплексів і підсистем базових станцій. За допомогою цих моделей визначаються показники ефективності функціонування підсистем в залежності від складу і об'ємно-часових характеристик. Для побудови моделей функціонування використовуються апарат і методи теорії масового обслуговування. При цьому передбачаються два типи моделей функціонування [22, 23, 24].

Рис.2.6. Загальна схема взаємозв'язку моделей синтезу структури підсистем БС

Моделі першого типу використовують математичний апарат однофазних систем масового обслуговування [22, 23, 24], на основі яких визначаються залежності виду $\Theta_{ij}(\boldsymbol{P}_j)$ для різних варіантів побудови підсистем БС. Зазначені залежності використовуються для розрахунку функцій виду $C_j(\boldsymbol{P}_j, r_j, \{\Theta_{ij}^*\})$, де $r_j \in R_j, R_j$ - безліч розглянутих варіантів комплектації технічних засобів j-го структурно-функціонального елемента. Методи розрахунку $C_j(\boldsymbol{P}_j, r_j, \{\Theta_{ij}^*\})$ описані в роботі [25]. Далі в розглянутому діапазоні можливих змін Pj

розраховується залежність $C_j(\boldsymbol{P}_j)$ яка використовуються в якості вихідних даних для вирішення приватних завдань другого рівня. У зв'язку з тим, що питання побудови моделей першого типу і їх застосування до дослідження структур і процесів функціонування технічних комплексів підсистем БС добре освітлені в наявній літературі [24, 22, 23], в подальшому розглядаються тільки моделі другого типу.

У моделях другого типу технічні комплекси і підсистеми БС відображаються у вигляді багатофазних систем масового обслуговування і використовуються для уточненого розрахунку структур технічних комплексів і підсистем, а також для постановки і розв'язання окремих завдань третього рівня [19, 22, 23].

Моделі другого рівня описують проблему оптимізації розміщення ВК і зонування базових станцій. На основі розрахунків за цими моделями фіксуються оптимальні числа і пункти географічного розміщення ВК, а також зони обслуговування кожного ВК – склад базових станцій, які приєднуються до даного ВК каналами зв'язку. В роботі [20] представлена модель у вигляді цілочисельного математичного програмування, а також запропоновано алгоритми оптимізації, засновані на застосуванні методу «гілок і меж». Для постановки і вирішення даної приватної проблеми використовуються вищезгадані структурні обмеження, відповідно до яких локальні ВК підключаються до зонального ВК прямими каналами зв'язку (радіально-вузлова структура підсистеми БС), а зональні ВК з'єднуються між собою каналами зв'язку за принципом «кожен з кожним».

На третьому рівні розташовані моделі мінімізації витрат на передачу та обробку інформації в зонах, а також витрат на обмін між ВК. Мінімізація витрат на передачу інформації здійснюється за рахунок концентрації потоків в підсистемі БС і зменшення структурної надлишковості BSS (використання транзитних маршрутів для обміну інформацією між ВК). Мінімізація витрат на обробку інформації здійснюється шляхом синтезу оптимальних структур ВК. Моделі оптимізації структур підсистем БС, сформульовані в термінах цілочисельного

математичного програмування і теорії множин, які представлені в [26]. Там же описані алгоритми пошуку оптимуму, засновані на методі «гілок і меж» і покоординатної оптимізації.

За допомогою моделей четвертого рівня здійснюється аналіз отриманих результатів синтезу структури підсистеми БС. З цією метою використовується метод статистичних випробувань. При цьому вирішується питання про те, чи забезпечують отримані структури виконання відповідних обмежень на показники пропускної здатності, надійності і достовірності. При негативному результаті виробляється корекція параметрів моделей третього рівня, і відповідні завдання вирішуються знову до отримання прийнятного варіанту структури підсистеми. Разом з тим проводиться комплексний аналіз показників ефективності функціонування підсистеми БС. Якщо отримані значення показників істотно гірше заданих (наприклад, більш ніж на 15%), то проводиться корекція параметрів моделей першого рівня і весь цикл розрахунків за системою моделей повторюється. Статистичне моделювання дозволяє досліджувати стійкість отриманих результатів відносно використаних аналітичних передумов і припущень про дисципліни обробки і передачі повідомлень, про алгоритми маршрутизації інформаційних потоків і т.п., а також врахувати вплив збоїв, відмов і відновленьв моделях вищих рівнів.

Отже, для фіксованих в результаті рішення проблем, що описуються моделями першого - четвертого рівнів, відповідно:

З цього можна отримати залежності виду $C_j(\boldsymbol{P}_j)$ витрат на підключення базових станцій до пунктів можливого розміщення зональних ВК, витрат на обробку даних в зональних ВК, витрат на обмін інформацією між зональними ВК;

визначаються оптимальні числа, розміщення зональних ВК і склад базових станцій кожної зони;

вибирається оптимальна структура технічних комплексів і підсистем БС;

визначаються показники ефективності функціонування підсистем БС з синтезованою структурою.

2.6. Обгрунтування критерію оптимізації в загальних і приватних задачах синтезу функціонально стійких підсистем базових станцій.

Завданням синтезу підсистеми базових станцій є визначення її структури і значень параметрів елементів, що входять в цю структуру відповідно до обговорених критеріїв і обмежень.

Наявність безлічі критеріїв ефективності підсистем БС визначає багатокритерійний характер завдання їх проектування і значно ускладнює розробку формальних методів. Для спрощення завдання проектування і його практичного вирішення визначають показник ефективності, який підлягає оптимізації, а інші переводять в розряд обмежень. Залежно від основного показника ефективності (критерію оптимізації) розрізняють наступні варіанти постановки задач синтезу обчислювальних мереж [26]:

- синтез обчислювальної мережі за критерієм мінімуму середнього часу затримки повідомлення в мережі $\tau_{ср}$ при заданих обмеженнях на надійність і вартість;

- синтез обчислювальної мережі за критерієм мінімуму вартості при обмеженнях на показники надійності і $\tau_{ср}$.

Головною є вимогою до обчислювальних мереж виконання мережею її основної функції - забезпечення базових станцій мережі потенційною можливістю доступу до розподілених інформаційних ресурсів. Всі інші вимоги - продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і масштабованість - пов'язані з якістю виконання цієї основної задачі.

Відповідно до цього, актуальною науковою задачею є підвищення ефективності функціонування підсистем базових станцій. Вирішенню цього завдання присвячено безліч наукових робіт [26, 27, 28, 29, 30].

Тому, у даній роботі поставлена задача синтезу структури підсистем БС за критерієм максимуму показника функціональної стійкості при обмеженнях на вартість проектування і експлуатації системи:

$$F_{РИС} = f(P_{ij}, w_{ij}) \rightarrow max,$$
$$C = \sum\sum C_{ij}(l_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \leq C_{зад}. \quad (2.19)$$

Слід зазначити, що дана постановка завдання синтезу підсистем БС з наукової точки зору є новою, і раніше не вирішувалась. У роботах, присвячених синтезу обчислювальних систем [26, 20, 29, 31,32] та ін., в основному вирішуються як загальні, так і приватні завдання синтезу:

Загальна задача синтезу - побудова структури мережі за критерієм міні-муму вартості при обмеженнях на $\tau_{ср}$і k-зв'язності структури, де k = 2 - обмеження на наявність не менше двох маршрутів передачі інформації між кожною парою вузлів комутації.

Приватне завдання синтезу - визначення параметрів структури (числа ребер, ступеня вершин, діаметр та ін.) Для заданої топології обчислювальної мережі - радіальної, деревовидної, кільцевої, радіально-вузловий і ін.

2.7. Вибір і обгрунтування математичної моделі підсистеми базових станцій E-UTRAN. Визначення елементів підсистеми,що впливають на функціональну стійкість.

Представимо підсистему базових станцій у вигляді неорієнтованого графа

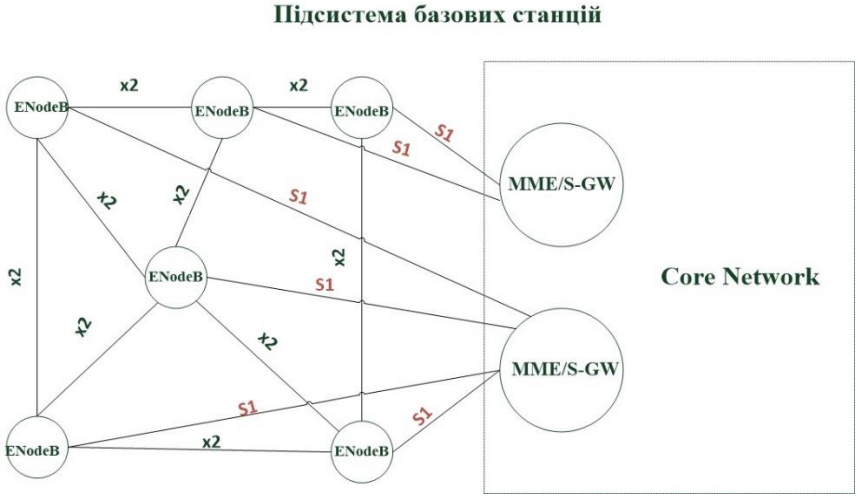


Рис. 2.7. Підсистема базових станцій у вигляді неорієнтованого графа

http://go.radisys.com/rs/radisys/images/paper-lte-eutran.pdf

Найбільш зручним способом формального опису структури підсистеми базових станцій є використання теорії графів, викладеної в [33, 34, 35], з яких будемо використовувати необхідні поняття, визначення, умовні позначення та математичні символи. Основним поняттям є поняття графа як деякої геометричної фігури, що складається з розкиданих в просторі вершин, з'єднаних ребрами. Будемо вважати, що структура підсистеми базових станцій задана графом.

$$G = \{D, \Phi, P\}, \tag{2.20}$$

де, D = {di} - безліч елементів графа таке, що D = V U L, що, в свою чергу, V = {vi} і L = {lij} - безлічі відповідно вершин і ребер графа такі, при цьому V ∩ L = ∅. Очевидно, що вершиною графа є базові станції – EnodeB, а ребрами– інтерфейси x2 та s1; Ф (lij) = vi & vj - відображення інцидентності і суміжності елементів графа; якщо вершина vi з'єднана з vj ребром lij, то кажуть, що ребро lij інцидентне вершинам vi і vj, а останні, в свою чергу, суміжні по ребру lij, при цьому vi і vj є вершинами граничної пари ребра lij;

P = {p (di) pi} - безліч статистично незалежних ймовірностей справного стану елементів графа (тут - символ «виключає або», тобто «Або»).

При необхідності може бути уточнений символ ймовірності справного стану відповідного елемента: для вершини p (vi) або pi, а для ребра p (lij) або pij. Імовірність несправного стану елемента графа позначається q (di) або qi (або q (vi) або qi і q (lij) або qij). Очевидно, що q (di) = 1 p (di). Тут же відзначимо, що справний стан i-го елемента графа позначається символом самого елемента, тобто di, а несправне - di.

Іноді, коли з контексту неясно, про що йде мова, для вказівки справного стану елемента застосовують символ $\bar{\bar{d}}_i$ тобто «не несправний». Символом $\grave{d}_i$ - позначається «байдужий» стан елемента. Наприклад, якщо розглянути повну групу подій, відповідних несправного стану хоча б одного з елементів, що утворюють ребро разом з вершинами його граничної пари, то видно, що після перетворень отримаємо, відповідні байдужому стану ребра:

$$\bar{v}_i l_{ij} v_j + v_i \bar{l}_{ij} v_j + \bar{v}_i \bar{l}_{ij} v_j + v_i l_{ij} \bar{v}_j + \bar{v}_i l_{ij} \bar{v}_j + v_i \bar{l}_{ij} \bar{v}_j + \bar{v}_i \bar{l}_{ij} \bar{v}_j =$$
$$= v_i \bar{l}_{ij} v_j + \bar{v}_i \left(l_{i,j} + \bar{l}_{ij}\right) v_j + v_i \left(l_{i,j} + \bar{l}_{ij}\right) \bar{v}_j + \bar{v}_i \left(l_{i,j} + \bar{l}_{ij}\right) \bar{v}_j =$$
$$= v_i \bar{l}_{ij} v_j + \left(\bar{v}_i v_j + v_i \bar{v}_j + \bar{v}_i \bar{v}_j\right) l_{ij} = v_i \bar{l}_{ij} v_j + \overline{v_i v_j} l_{ij}.$$

Тут $\overline{v_i v_j} = 1 - v_i v_j$, що відповідає події несправного стану хоча б однієї вершини граничної пари ребра lij. Імовірність «байдужого» стану дорівнює 1, так як $p\left(l_{ij}\right) = p_{ij} + q_{ij} = 1$.

У загальному випадку розрізняють неорієнтовані, орієнтовані і змішані графи, що описують системи передачі інформації. Будемо використовувати тільки неорієнтовані графи без петель і кратних ребер.

Структура графа крім його типу характеризується такими показниками, як потужність його множин D, V, L і локальним ступенем вершин. Під потужністю множини розуміється число елементів, що входять в данумножину. У графі розрізняють безлічі елементів D = {di}, V = {vi} і L = {li,j}, тому потужності цих множин позначають символом m з відповідним індексом, тобто mD, mV і mL, при цьому завжди mD = mV + mL. У загальному випадку потужність будь-якої безлічі A = {ai} позначаєтьсяm_A та (іноді для цих же цілей використовують позначення | A |, але цей символ не завжди зручно застосовувати). Таким чином, потужності множин підсистеми базової станції E-UTRAN в представленому на мал. 2.10 графі дорівнює: mD = 23, mV = 8, mL = 15.

Під локальної ступенем вершини δ (vi) розуміється число інцидентних їй ребер. Наприклад, локальна ступінь вершин дорівнює: δ (v3) = 4, δ (v5) = 2 (див. мал. 2.10). Іноді замість δ (vi) використовується символ δi, наприклад, δ3 = 4. У структурі графа потужності множин та локальні ступеня вершин взаємопов'язані. Дійсно, наприклад, потужність безлічі ребер можна ви-числиться за формулою:

$$m_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \delta_i ; m_L = \sum_{i=1}^{m_V - 1} \sum_{\substack{v=1 \\ j \in v}}^{\delta_i} \alpha_j , \quad (2.2)$$

де αij - коефіцієнт ребра li, j, що входить в ступінь i-ї вершини, при цьому αj = 1 при i <j та αj = 0 при i> j. Стосовно до графу, зображеному на рис.2.1, потужність безлічі L буде представлена сумою виду: mL = (1 + 1 + 1) + (0 + 1 + 1) + (0 + 0 + 1 + 1) + (0 + 0 +1) + + (0 + 1) + (0 + 0 + 0) = 9. Тут прийнято, що проходження номерів j-х вершин визначено в порядку їх зростання. Наприклад, для i = 1 (див. Рис.2.1) змінна j в (2.2) послідовно прийняла значення j = 2,3,4, а для i = 3 - відповідно j = 1,2,4,6.

Висновки до розділу 2

У даному розділі була запропонована методика синтезу структури підсистеми базових станцій та було визначено, що задача синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій зводиться до мінімізації витрат на її побудову при забезпеченні мінімально допустимих обмежень по якості обслуговування абонентів. Дана методика складається з двох методик – методики загального синтезу мережі та методики часткового синтезу мережі. В якості критерію оптимізації прийнятий максимум функціональної стійкості підсистем базових станцій.

Також була розглянута методика вибору необхідного обладнання, визначені переваги та недоліки даної методики. На доданок цього, було визначено завдання побудови початкового наближення, складність якого полягає в тому, що неможливо знайти прямого рішення, так як.для побудови мережі початкового наближення потрібно мати великий набір вихідних даних, тому що достовірність може істотно вплинути на адекватність прийнятого рішення.

Проведено оцінку бюджета втрат і зони покриття. 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:

Також була розроблена схема вирішення проблеми синтезу оптимальної структури підсистеми БС. Таким чином, традиційна постановка проблеми синтезу

базується на мінімізації вартості при обмеженнях на показники ефективності функціонування та надійності.

Проведено вибір і обгрунтування математичної моделі підсистеми базових станцій E-UTRAN. Визначено елементи підсистеми, що впливають на функціональну стійкість.Таким чином, математичною моделлю для дослідження функціональної стійкості підсистем базових станцій є неорієнтований граф з абсолютно надійними вершинами і ненадійними ребрами. Тому, підсистема базових станцій була представлена у вигляді саме неорієнтованого графу.

Однак, основною складністю застосування запропонованого методу синтезу структур є труднощі відомості функціоналу якості та обмежень до лінійних функцій в залежності від елементів матриці суміжності графа структури.

Список використаних джерел

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400с.

2. Громаков Ю.А. Способ повышения скорости передачи данных в сетях GSM на основекогнитивного радио / В.В. Родионов, К.С.Настасин // Электросвязь. – 2012 – №1 – С.13-23.

3. Крупнов А.Е. Перспективы формирования рынка услуг нового поколения и операторывиртуальных сетей подвижной связи/Скородумов А.И. //«Мобильные системы»–2005.– №6. – С. 24-32.

4. Оморова С.Т. Особенности планирования сетей сотовой связи LTE/Известия ОшТУ – 2017 №1 – С. 27-30.

5. Безрук В.М., БондарьИ.В.Особенности планирования сетей сотовой связи 3-го поколения//Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2009 (39) –С.60-65.

6. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. – М.: Мир, 1975. Т.2.

7. Клейнрок Л. Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений. – М.: Наука, 1970.

8. Р. С. Одарченко, Н.В. Дика, Дослідження архітектури мереж стільникового зв’язку в Україніта можливості їх переходу до мереж LTE//Наукоємні технології– 2016 –№3(31)– С.291-298.

9. Використання мо-делі Хата для оцінки швидкості передавання даних по каналах антен-них систем MIMO всередині приміщень//Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – №2 (34). – С. 132-138.

10. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядови произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.:Наука, 1971. – 540 с.

11. Артюшин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.

12. Надежность и живучесть систем связи /Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов и др.; Под ред. Б.Я. Дудника. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

13. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов / Под ред. В.С, Семенихина. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.

14. Филин Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. – М.: Радио и связь, 1988.

15. Богатырев В.А. Расчет надежности сетей связи по совокупности путей // Электросвязь, 1981. №2. – С.42 – 44.

16. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях //Нечепуренко М.И., Попков В.К., Майнагашев С.М. и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 515с.

17. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.

18. Esary J., Proshan F. Coherent Structures of Non-Identical Components // Technometrics. 1963. – V. 5. – № 2, – P. 191-209.

19. Полесский В.П. Нижняя оценка надежности сети с двусвязной структурой // Пробл. передачи информ. – 2000. – Том. 36. – № 3. – С. 55 – 64.

20. Янбых Г.Ф., Столяров Б.А. Оптимизация информационно-вычислительных сетей. – М.: Радио и связь, 1987. – 232 с.

21. Янбых Г.Ф.. Эттипгер Б.Я. Методы анализа и синтеза сетей ЭВМ. – Л.: Энергия, 1980. – 96с.

22. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. – М.: Мир, 1975. Т.2.

23. Клейнрок Л. Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений. – М.: Наука, 1970.

24. Липаев В.В., Колин К.К., Серебровский Л.А. Математическое обеспечение управляющих ЦВМ. – М.: Советское радио, 1972.

25. Основы построения больших информационно-вычислительных сетей / Под ред. Д.Г.Жимерина, В. И. Максименко. – М.: Статистика, 1976.

26. Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 167 с.

27. Королев А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.

28. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы технологии, протоколы. – С.-Пб.: Питер, 1999. – 668 с.

29. Артамонов Г.Т. Топология регулярных вычислительных сетей и сред. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.

30. Васильев В.И., Коновалов В.М., Заманский Л.Я. Графы кодов, устройства и сети передачи сигналов данных. – М.: «Радио и связь», 1985.

31. Суздалев А.В. Сети передачи информации АСУ. – М.: Радио и связь, 1980. – 153 с.

32. Демьянчук В.С., Броди С.М. Надежность обслуживаемых радиоэлектронных систем. – К.: Вища школа, 1976. – 160 с.

33. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети.– М.: Наука, 1994.– 368 с.

34. Уилсон Р. Введение в теорию графов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 208 с.

35. Оре О. Графы и их приложение. – М.: Эдиториал, 2003.

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

Протягом останнього часу трафік передачі даних в мережах мобільного зв'язку стабільно зростає. Це обумовлено тим, що серед абонентів стійко зростає популярність планшетних комп'ютерів і смартфонів, а самі вони стають все доступніше.[1]

Нові смартфони, планшетні персональні комп’ютери,ноутбуки та інші «розумні» пристрої надають користувачам нові можливості. Сучасні обчислювальні машини, об'єднані в комп'ютерну мережу, часто володіють множинними мережевими інтерфейсами: ноутбуки поставляються з Ethernet- і Wi-Fi- адаптерами, в комп'ютери встановлюються кілька мережевих карт, смартфони мають можливість використовувати як Wi-Fi або LTE - мережі. Завдякицьому з’являється попит на більш швидкісний зв’язок. Мережеві технології стають все більш динамічними, тому швидко ростуть вимоги і до пропускної здатності. Для збільшення швидкості передачі даних, надійності або зменшення затримок набирає популярність тенденція передавати дані по декількох каналах зв'язку одночасно. З метою задоволення цієї потреби виникли багатоканальніпротоколи передачі даних і технології агрегування каналів.

Саме тому сучасні оператори мобільного зв’язку починають впроваджувати у свої мережі нові технології, здатні забезпечити абонентам необхідну швидкість з’єднання і якість зв’язку [2].

Тому, в мережі за рахунок одночасної роботи багатьох стільників різного рівня значно збільшується споживана потужність мережі. Підвищення ефективності енергоспоживання є важливим фактором забезпечення функціональної стійкості підсистеми БС для її тривалої автономної роботи під впливом зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Таким чином, виникає проблема скорочення енергоспоживання обладнання, а саме базових станцій , оскільки вони споживають до 80% всієї

енергії, що потрібна для роботи мережі.[3] Скорочення енергоспоживання мережею дає можливість зниження експлуатаційних витрат оператора зв'язку

Основними завданнями, які вирішуватимуться в третьому розділі даної роботи, є наступні:

1. Аналізування методів розвантаження радіомережі і паралельного використання декількох каналів. Зокрема, необхідно з’ясувати основні переваги та недоліки технологій розвантаження а також їх базові принципи.

2. Розглянути технології та процедури багатоканальної передачі даних в мережах 5G. Необхідно приділити особливу увагу такій технології як Multilink, визначити переваги цієї технології**,** а також розглянути нову архітектуру ядра мережі.

3. Аналізування транспортних протоколів для багатоканальної передачі даних. Зокрема потрібно розглянути протоколи MP-QUIC та Multipath TCP з’ясувати основні переваги ,недоліки та вимоги, висунуті до цих протоколів

4. Аналізування методів підвищення енергоефективності підсистем БС, а саме необхідно розглянути шляхи зниження енергоспоживання та використання альтернативних джерел енергії.

3.1. Методи розвантаження радіомережі і паралельного використання декількох каналів

3.1.1. Існуючі методи

Як вже було зазначено в попередніх розділах, впродовж останнього часу кількість інформації, що передається в мережах мобільного зв'язку, величезна і продовжує рости швидкими темпами.Тому постає серйозна проблема перевантаженості своїх радіомереж.Рішенням якої є розвантаження мережі, тобто переклад частини трафіку в інші мережі з меншим розміром комірок. Для мереж LTE характерна неоднорідність їх структур, тому в них можливо кілька варіантів розвантаження: SmallCells[4,5], фемтосоти [6,7] і Wi-Fi[8,9].

Проведений аналіз показав однозначні переваги використання Wi-Fi Data Offload як технології для розвантаження стільникового трафіку даних:

1. Приблизно 80% зазначеного трафіку використовується, коли передплата стаціонарна (тобто не мобільна), наприклад: з-під будівлі, будинку, офісного комплексу, торгових центрів тощо. Таким чином, рухливість тут навіть не потрібна.

2. Зараз, майже всі смарт-пристрої підтримують Wi-Fi. Таким чином, додаткові витрати не потрібні з точки зору підписки.

3. Wi-Fi мережі є майже скрізь та мають низьку вартість.

4. Wi-Fi спектр не ліцензований і може використовуватись багаторазово. Таким чином, Wi-Fi стає очевидним вибором для мережевих операторів. Це може допомогти покращити покриття стільникового зв'язку та збільшити пропускну спроможність завдяки повторному використанню спектру в районах, де формується більша частина трафіку даних, наприклад, в будинку. Таким чином, стільникова мережа повинна використовуватися для високоінтенсивного трафіку QoS, а також вимог щодо мобільності, наприклад VOIP, де Wi-Fi використовується для трафіку з низьким рівнем QoS, наприклад завантаження, веб-серфінг тощо.

Базові принципи, на яких побудована технологія Wi-Fi Data Offload, прописані в специфікаціях консорціуму 3GPP [10]:

• Можливість роботи абонента в Wi-Fi мережах оператора і його партнерів;

• «Безшовний» перехід між мережами 2G / 3G і Wi-Fi (без втрати сесій);

• Прозора аутентифікація в мережах Wi-Fi для абонента на підставі даних SIM-карти;

• Централізація трафіку передачі даних в рамках PS-CN оператора;

Виконання даних умов означає, що при попаданні абонента в зону дії мережі Wi-Fi оператора зв'язку (або його партнера), повинен здійснюватися автоматичний переклад трафіку передачі даних, і це не повинно вимагати певних дій від абонента. Важливим моментом, також, є те, що Release 8 3GPP вже розглядає Wi-Fi мережі, як довірені і рівноправні, в плані безпеки.

Для операторів, які успішно використовують рішення для розвантаження Wi-Fi, ми вважаємо, що в рамках рішення мають існувати три основні компоненти:

- Механізм надання динамічного характеру політики оператора щодо незапланованих дій мереж на пристрій.
- Алгоритми в пристрої для виявлення характеристик незапланованих мереж Wi-Fi та визначення найкращого використання наявних мереж.
- Механізм, який дозволяє безперешкодний хендовер між 3G / LTE та Wi-Fi.

Серед існуючих базових моделей інтеграції, найбільш актуальною і привабливою для оператора є модель управління перенесенням навантаження з мережі мобільного зв'язку в мережу Wi-Fi на базі IP-шлюзу. Цей підхід дозволяє розгортати незалежні Wi-Fi-мережі без необхідності інтеграції з мережами мобільного зв'язку. Перевірка автентичності та реєстрації в операторській Wi-Fi-мережі виконується відразу після її виявлення за допомогою абонентського пристрою. Після чого всі дані, відправлені з абонентського пристрою, починають передаватися Wi-Fi мережею через IP-шлюз, при цьому оператор має можливість контролювати мережеві підключення абонента. Потрібно відзначити, що неавторизований користувач, що знаходиться в зоні Wi-Fi, не зможе отримати доступ до абонентського контенту від мобільного оператора.[11]

Доступ через Wi-Fi може бути довіреним (мережа Wi-Fi операторського класу з безпечним методом аутентифікації) та недовірливою (громадські відкриті точки доступу - Hotspots, домашні бездротові локальні мережі користувачів). Проте в мережах 5G поки що залишається відкритим питання, яким чином доставляти пакети до адресата через мережі не-3GPP. Тому в даній дисертаційній роботі запропонована удосконалена архітектура мережі 5G із додаванням цього функціоналу.

3.1.2. Багатоканальна передача даних в мережах 5G

Multilink (ML) - це технологія одночасного використання декількох ліній зв'язку для доставки контенту[12]. Основним еталонним сценарієм є експлуатація різнорідного бездротового зв'язку для покращення надання послуг.

Для цього є кілька варіантів рівня.

Стратегії відправки контенту:

а) реплікація – одночасна передача одного і того ж вмісту всім посиланням;

б) переключення – відправка всього вмісту на одне посилання, а потім переключення між посиланнями;

в) балансування навантаження – збалансувати вміст між усіма посиланнями, щоб кожен потік даних, або IP-адресація або програма, використовувала одне з посилань;

г) зв'язування – розгляд всіх доступних посилань, як єдине віртуальне широкосмугове з'єднання та розподілення всього вмісту між усіма доступними посиланнями динамічно в кожний момент, відповідно до ефективності кожного з посилань.

У сценаріях, що вимагають високої пропускної здатності або гарантованої безперервності обслуговування, користувачеві може знадобитися кілька одночасних з'єднань. Наприклад, агрегація даних з кількох підписок на LTE, 3G та Wi-Fi (і навіть фіксовані мережі) збільшує доступну пропускну здатність. Для підтримання безперервності служби після того, як обладнання користувача матиме доступ до покриття Wi-Fi, потрібен мережевий доступ до стільникового зв’язку (наприклад, 5G або LTE). У цих стратегіях функціональність ML здатна змінювати пакети даних через різні доступні посилання, а ML-MW (проміжне програмне забезпечення Multilink) виконує операцію злиття з'єднання на UE. ML-MW на стороні, що переглядається , спілкується з ML-GW, яка може бути розташована або в базовій мережі, або у хмарі залежно, наприклад, від обмежень розгортання. Ці два об'єкти (ML-GW та ML-MW) обмінюються інформацією про ефективність кожного посилання.

Multilink ще повністю не стандартизований, але він використовує набір стандартизованих протоколів та технологій для забезпечення кращої роботи користувачів та надійності з'єднань.

Вміст, переданий від ML-GW до пристрою для перегляду, розподіляється або дублюється над доступними каналами, які є можливо від різних операторів, або використовують різні технології або IP-маршрути відповідно до їх тимчасової продуктивності. Рішення щодо розбиття або дублювання залежить від бажаного збільшення пропускної спроможності, допоміжної інформації та надійності. Після цього вміст збирається знову на пристрій для перегляду (з можливими видаленнями дублікатів), як послідовний потік даних, готовий для перегляду. Сам вміст не маніпулюється, а це означає, що доставка абсолютно агностична до вмісту.

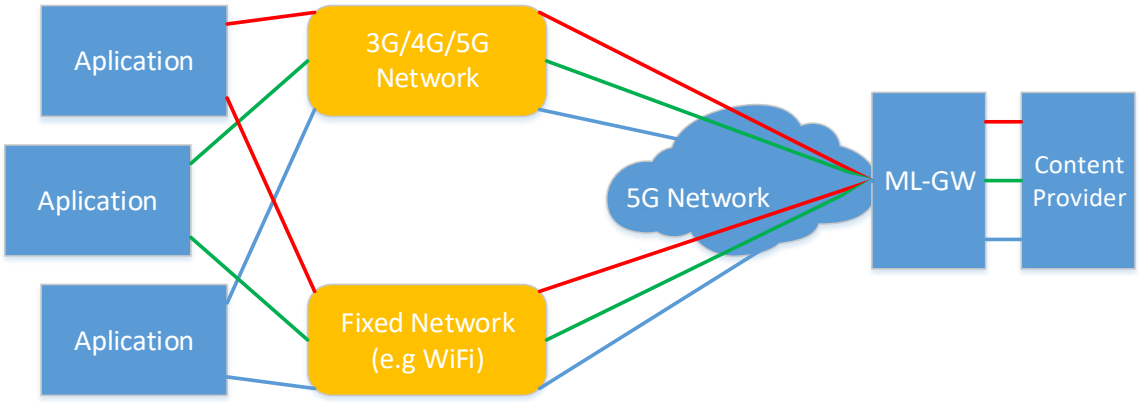


Рис. 3.1. Figure X: Architectural view of ML

Основні етапи розділення даних та зв'язування з ML на рівні IP є:

1. Обчислити в режимі реального часу зміни в продуктивності на рівні додатків кожного каналу зв’язку (наприклад, «корисна пропускна здатність», час затримки і т.д) в кожному з відповідних напрямків (наприклад, по висхідній лінії зв'язку, низхідна лінія зв'язку).

2. Обчислити загальний доступний показник "корисної пропускної здатності " у кожному пункті часу.

3. Поділ неперервного потокуданих повинен бути переданий до всіх доступних каналів відповідно до виконання кожного каналу (тобто, щоб не було «перевантаження» будь-якого з цих каналів зв’язку).

4. На стороні UE необхідний буфер для розміщення позачергових надходжень пакетів, несправних пакетів тощо.

5. Об'єднати розділений вміст з кількох каналів зв’язку у один загальний потік.

6. У деяких випадках (наприклад, відео в реальному часі), можна додати інтегрований процес кодування відео, який виводить кодований живий або просто за часом транскодованого відеопотоку, який адаптивно відповідає миттєвою продуктивністюбагато чисельності практичногосполучення каналів.

Для забезпечення даних процедур, до вже існуючої архітектури 5G необхідно включити додатковий функціонал:

а) ML-CP – Multi-Link в мережі управляючого рівня;

б) ML-UP – Multi-Link в мережі передавального рівня;

в) ML-MW – функція проміжного програмного забезпечення Multi-Link у послідовному програмному забезпеченні в поєднанні з UE;

г) XCF – 5G-Xcast функція управляючого рівня;

д) XUF – 5G-Xcast функція передавального рівня;

е) Multicast Coordination Entity (MCE) – багатоадресний координаційний орган. Є частиною загальної MBMS і відповідає за координацію радіоресурсів стільникового зв'язку. Обов'язки MCE включають контроль надходження та розподіл радіоресурсів, пов'язаних з послугами eMBMS;

є) Non-3GPP InterWorking Function (N3IWF) – Функція взаємодії non-3GPP. N3IWF з'єднує 5G з мережами доступу non-3GPP.

3.1.3. Нова архітектура ядра мережі

Побудована архітектура ядра мережі з додатковим функціоналом розділяється на блоки:

а) користувальницьке обладнання UE;

б) керуючий рівень CP;

в) передавальний рівень UP;

Удосконалена архітектура представлена на рис. 3.2:

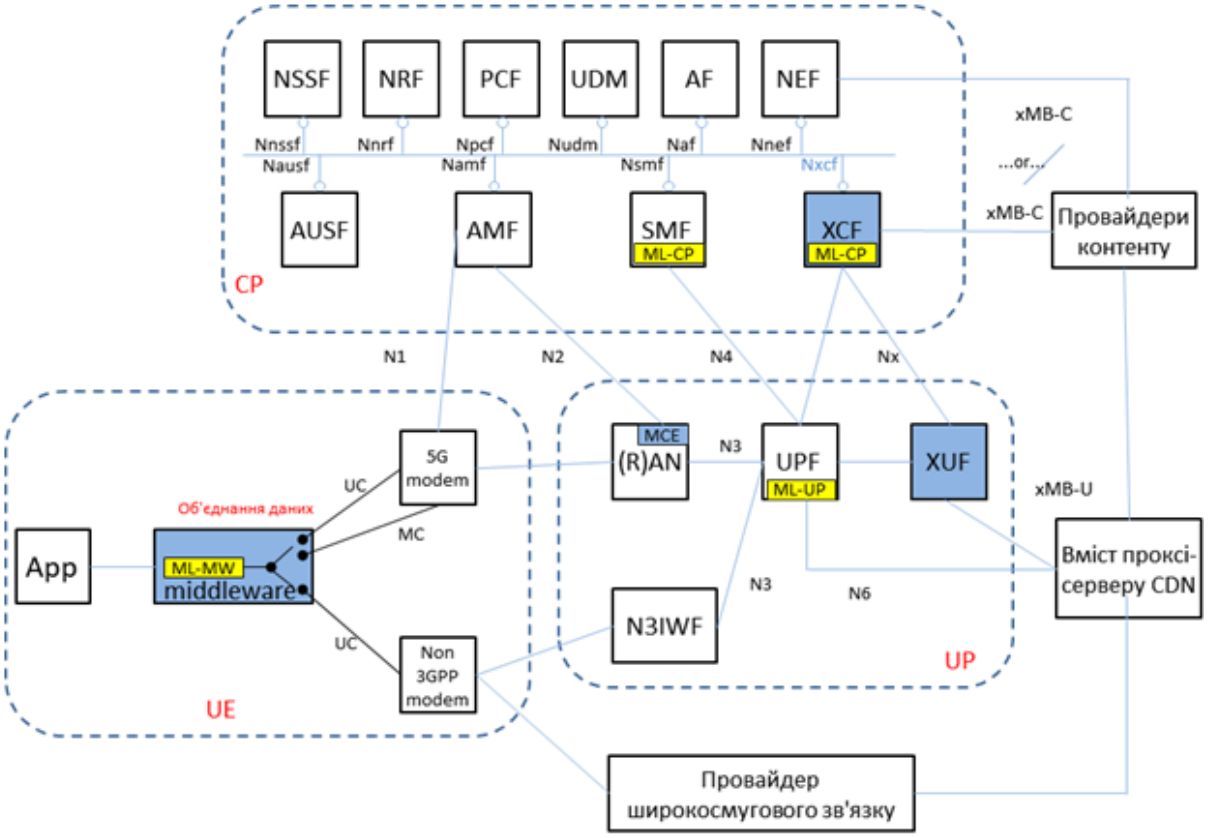
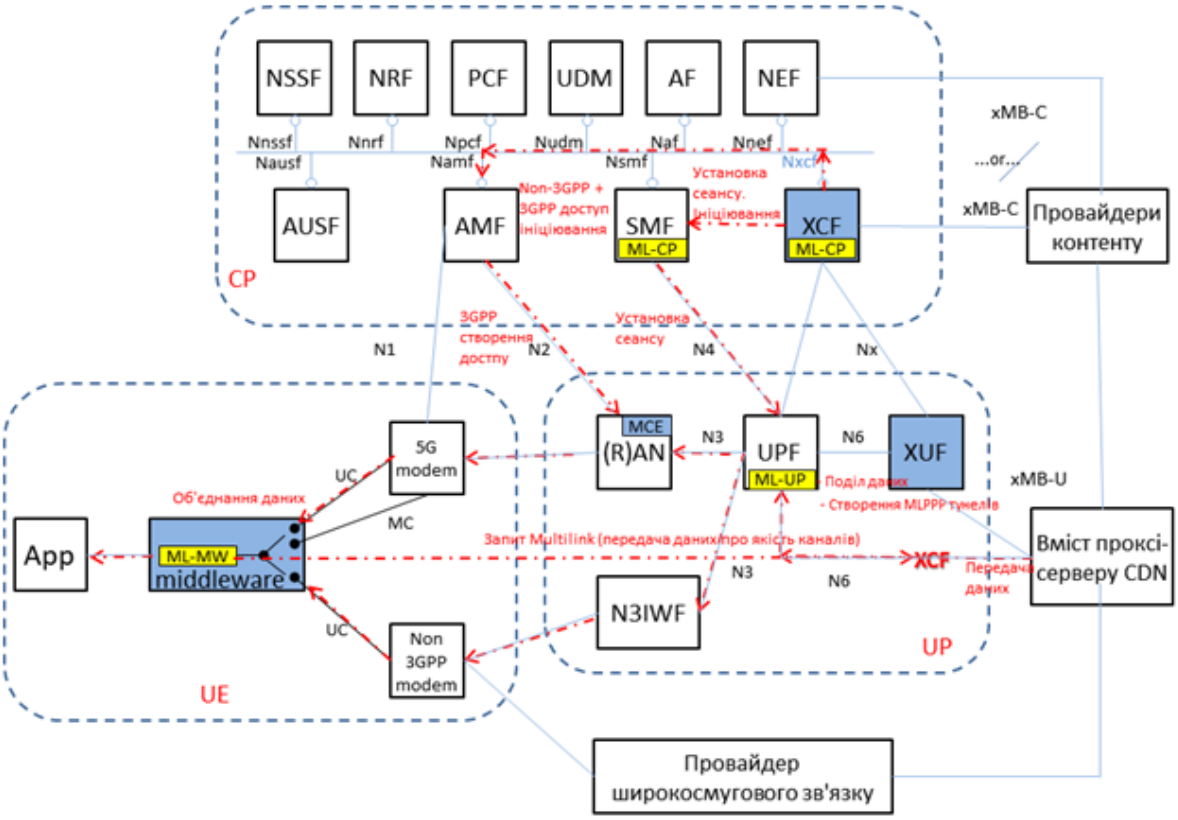


Рис. 3.2. Нова архітектура ядра мережі

3.1.4. Приклад поділу трафіку

Нижче показано, як можуть застосовувати передбачені правила доступу до трафіку керування, комутації та розбиття (ATSSS) для прийняття рішення про розподіл трафіку через 3GPP та доступ до non-3GPP. Правила ATSSS, показані на цьому малюнку, є правилами прикладу, які мають на меті пояснити, як вони можуть бути використані для вибору доступу, на який повинен передаватися потік даних.

Дані правила представлені на рис. 3.3:

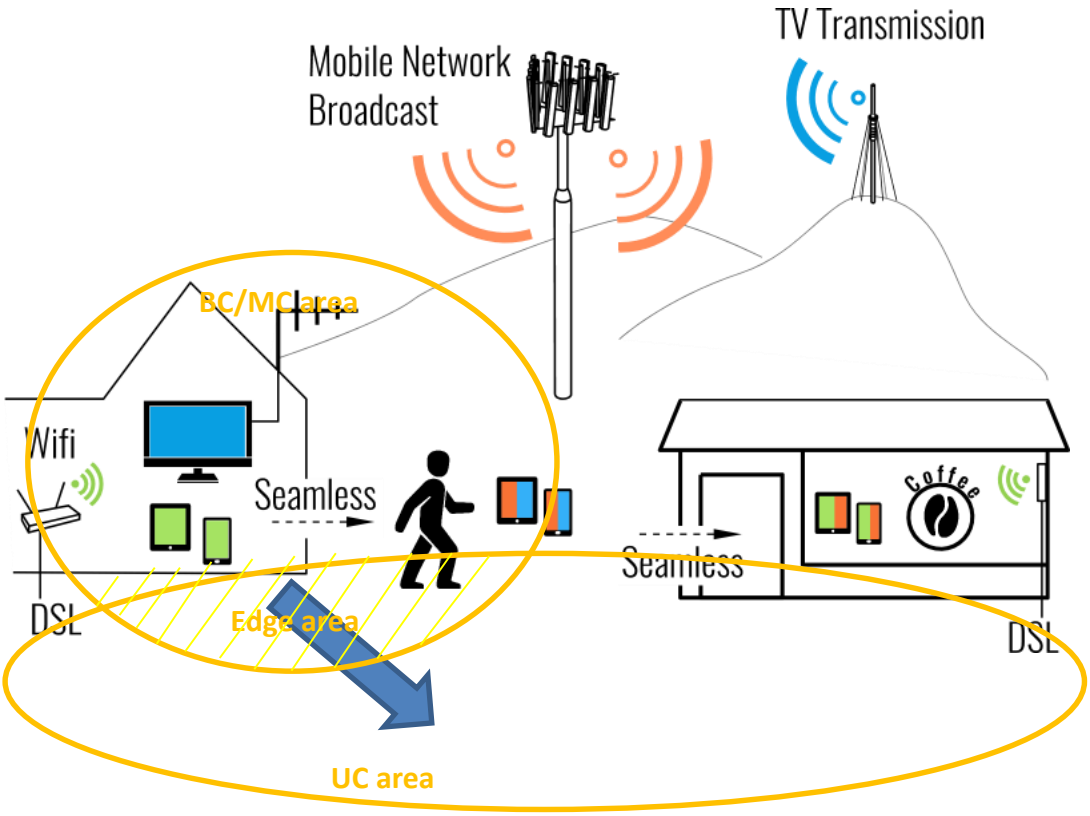


Мал. 3.3. Архітектура мережі з прикладом поділу трафіку

3.1.5. Процедури багатоканальної передачі даних

3.1.5.1. Варіанти використання: На краю області MBMS

Мобільний пристрій (користувальницьке обладнання) знаходиться на краю широкосмугової / багатоадресної (BC / MC) області. Потрібно врахувати те, що "крайова область" означає край з точки зору рівня обслуговування (підземні тощо) (рис. 3.4)



Мал. 3.4. Реалізація Multilink на краю зони обслуговування MC / BC і UC

У цьому випадку відбуваються наступні умови та обмеження:

Погане широкомовне обслуговування або мобільний користувач, що входить до та з цієї зони обслуговування;

Вміст передається цьому користувачеві також у одноадресному повідомленні (UC);

Це той самий вміст (або FEC або аналогічний його варіант);

Таким чином, користувач може створювати повноцінне якісне та надійне відео, якщо він отримує лише ML у хорошій якості. Це дозволить користувачеві отримати найкраще якісне відео над UC, дозволяючи безперебійний і швидкий перехід між MC і UC, у тому числі під час мобільності та в будинку.

Multilink потенційно може залучити багато користувачів для:

• величезної передачі файлів;

• потокового передавання відео високої/дуже високої чіткості;

• доставки вмісту на основі об'єкту.

Перехід від багатоадресної передачі до одноадресної (multilink) для цього випадку може бути надзвичайно корисним безперешкодний перехід між різними областями.

Переваги цього сценарію:

• Кінцевий користувач: покращений QoE

• Мережевий оператор: зниження ресурсу мережі

Проходження викликів

Відео (файли, пряма трансляція тощо) транслюються по каналу багатоадресної передачі.

Через очікувану кількість сеансів на цьому каналі, низький рівень якості кожного каналу, UE приймає рішення про оптимізацію своїх мережевих ресурсів та загального QoE, використовуючи кілька доступних каналів.

Налаштування конфігурації

Припускаємо, що UE вже зареєстрований в мережі 5G Core.

Після того, як абонент виходить з області broadcast /multicast, unicast, UE оцінює якість інформації про доступний канал (NR, LTE, Wi-Fi тощо) (доступна пропускна здатність, середня затримка тощо). Під час цього процесу багатопотокове проміжне програмне забезпечення вирішує створити багатосторонній сеанс для покращення передачі даних.

3.1.5.2. Процедури встановлення з'єднання

Процедура погодження двома кінцевими вузлами мережі деяких параметрів процесу обміну даними називається встановленням логічного з'єднання. Наявність такого з'єднання дозволяє більш раціонально обробляти пакети. Наприклад, при втраті декількох попередніх, може бути знижена швидкість відправки наступних. Або завдяки нумерації пакетів та відстеження кількість надісланих та отриманих, можна підвищити надійність, шляхом відкидання дублікатів, упорядкуванням тих, що надійшли і повторення передачі втрачених пакетів.

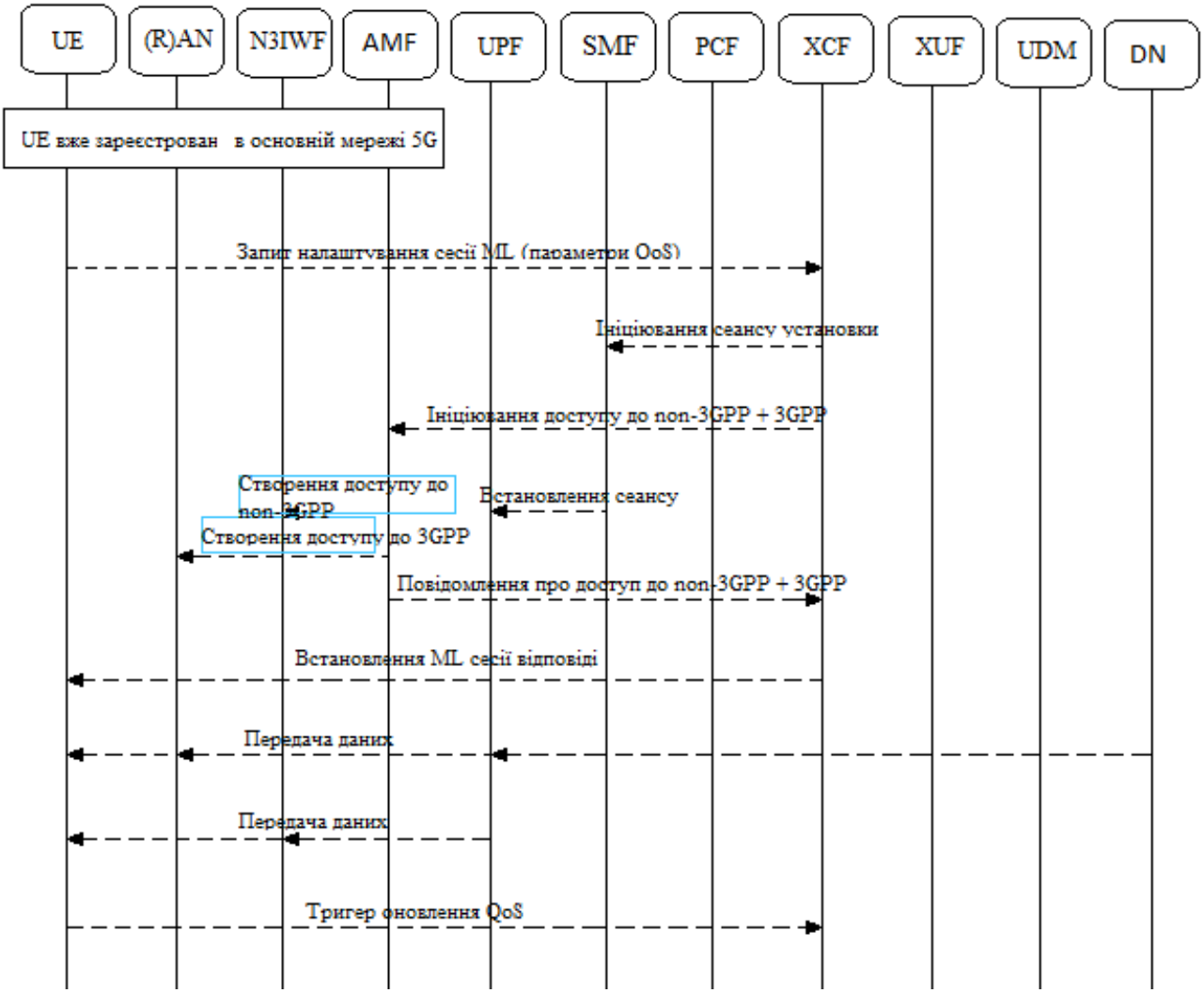


Рис. 3.5. Процедури встановлення з'єднання

Коли відправник і одержувач фіксують початок нового з'єднання, вони, перш за все, «домовляються» про початкових значеннях параметрів процедури обміну і тільки після цього починають передачу даних.

Операції підключення складається з трьох кроків:

а) вузол-ініціатор з'єднання відправляє вузлу-одержувачу службовий пакет з пропозицією встановити з'єднання;

б) якщо вузол-одержувач згоден з цим, то він посилає у відповідь інший службовий пакет, який підтверджує встановлення з'єднання і пропонує деякі параметри, які будуть використовуватися в рамках даного логічного з'єднання. Це

можуть бути, наприклад, ідентифікатор з'єднання, кількість фреймів, які можна відправити без отримання підтвердження;

в) вузол-ініціатор з'єднання може закінчити процес встановлення з'єднання відправкою третього службового пакета, в якому повідомить, що запропоновані параметри йому підходять;

Процедури встановлення з'єднання для архітектури 5G зображено на рис. 3.5:

Встановлення сеансу:

1. UE після того, як зареєструвався в основній мережі 5G подає запит на встановлення сеансу ML;

2. XCF пересилає запит до SMF та AMF.

3. AMF пересилає запит до N3IWF (встановлення з'єднання Non-3GPP) та RAN (встановлення з'єднання 3GPP).

4. AMF надсилає сповіщення про доступ до Non-3GPP + 3GPP до XCF.

5. XCF надсилає відповідь на встановлення сеансу ML для UE.

6. XUF забезпечує доставку даних до UPF.

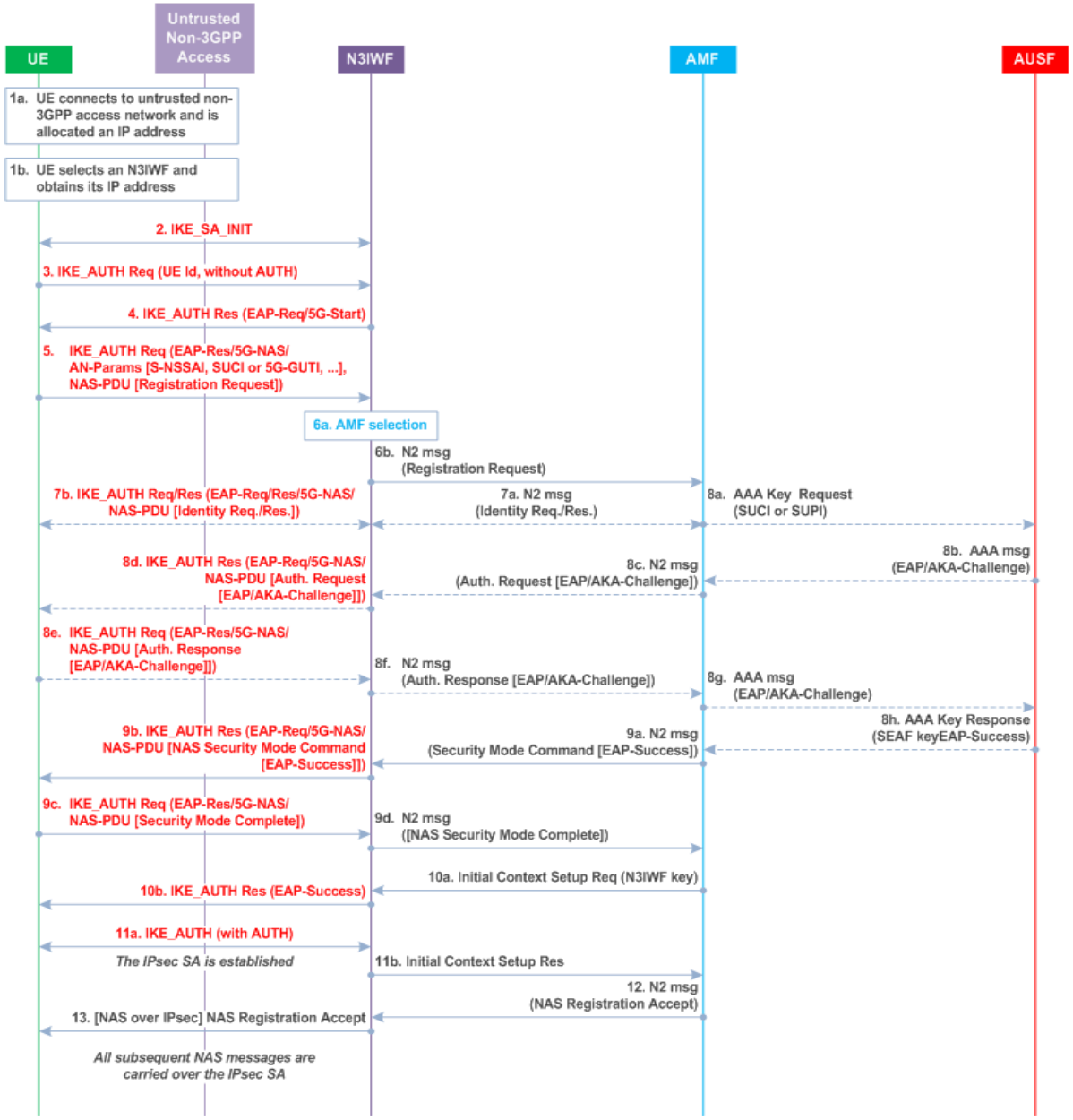
7. UPF забезпечує доставку даних передплатнику через два доступні канали 3GPP та Non-3GPP.

8. UE надсилає тригер оновлення QoS до XCF.

Створення зв'язку 3GPP та не 3GPP

Процес створення 3GPP та Non-3GPP описаний в 3GPP TS 23.502 V15.0.0 (2017-12).

У процедурах встановлення з'єднання блок створення доступу до non - 3GPP представлено на мал. 3.6:



Мал. 3.6. Створення доступу до non - 3GPP

Створення сеансу PDU через ненадійний доступ до Non-3GPP описано на діаграмі нижче (рис. 3.7).

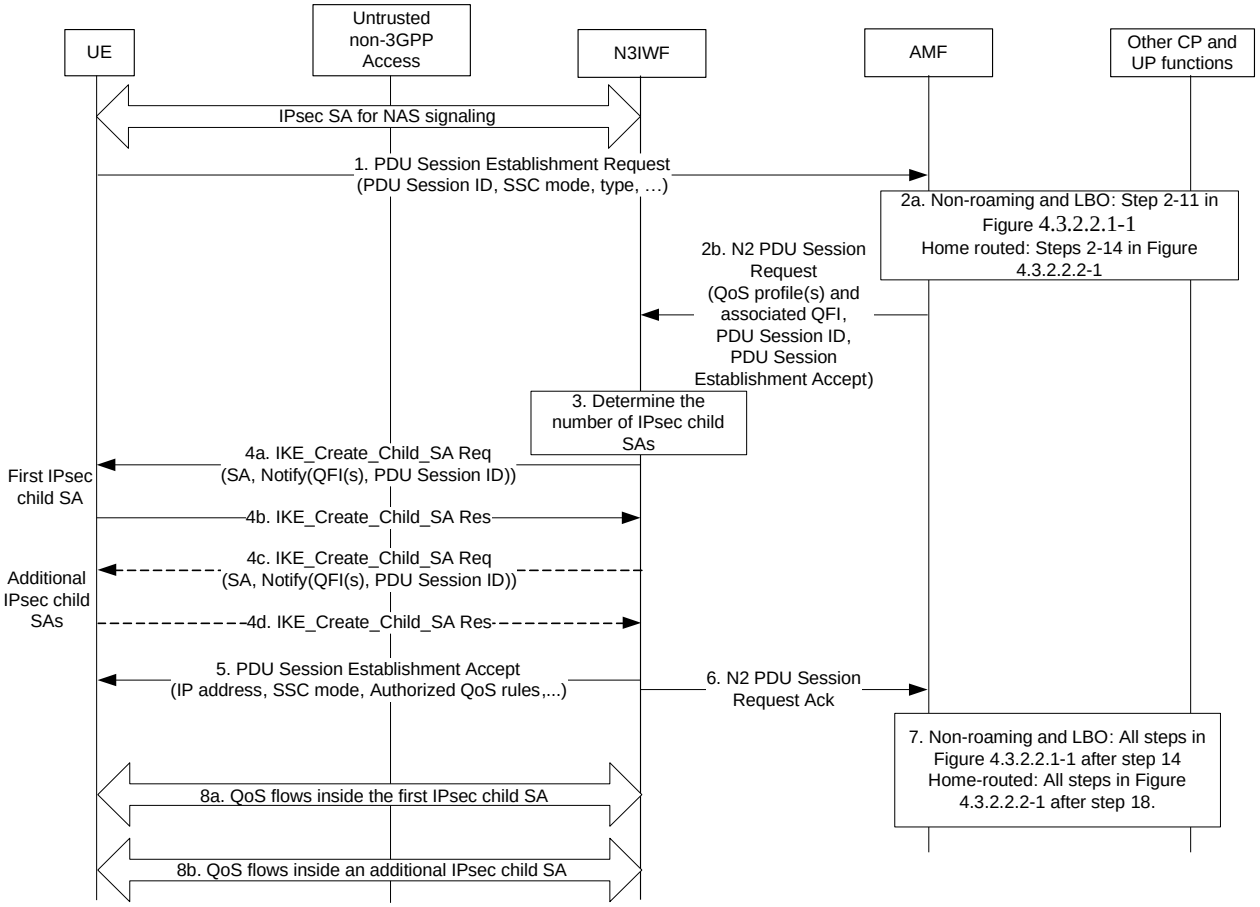
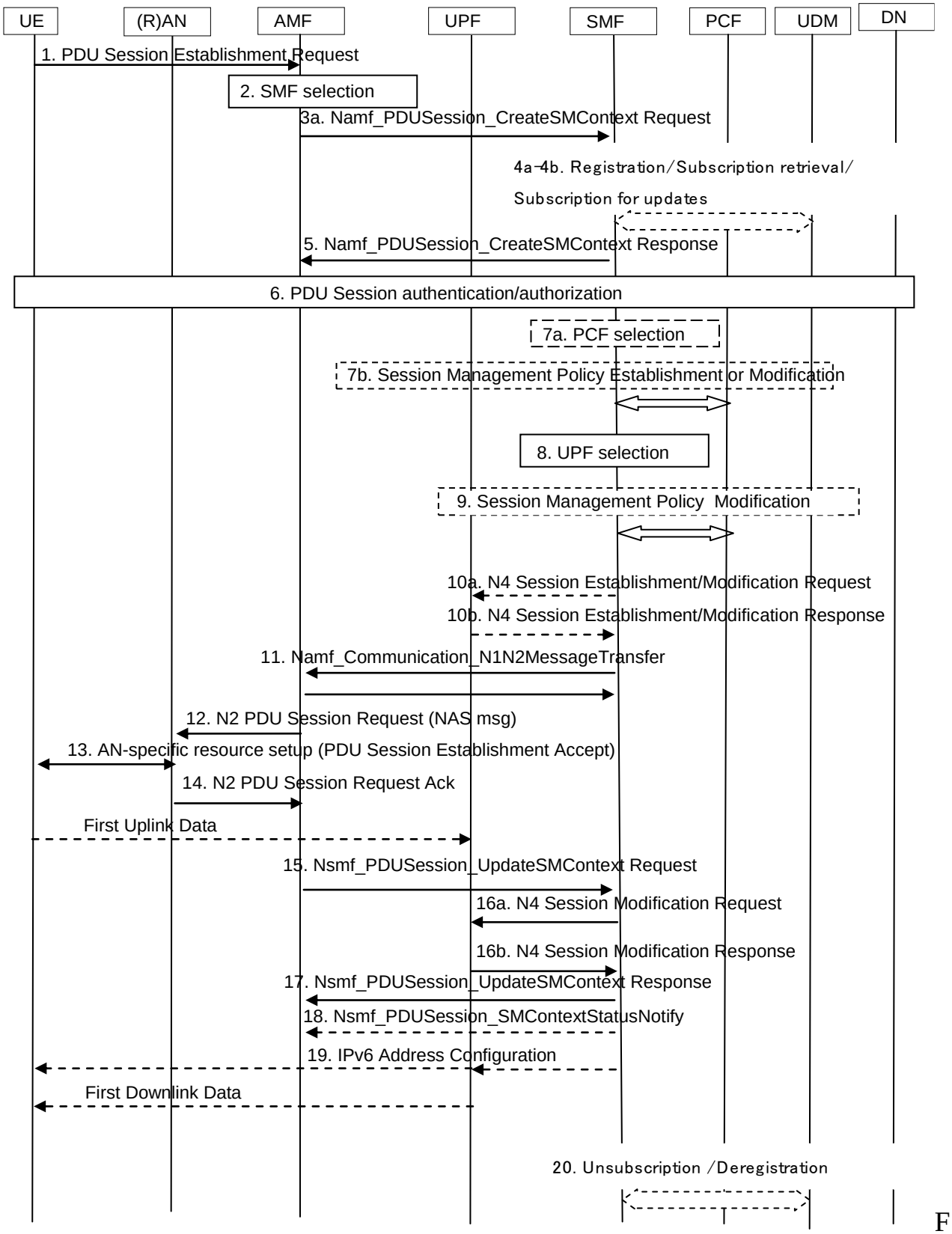


Рис. 3.7. Процес створення Non-3GPP

На діаграмі нижче описано запит UE на встановлення сеансу PDU (рис. 3.8).



F

Рис. 3.8. Запит UE на встановлення сеансу PDU

3.1.6. Транспортні протоколи для багатоканальної передачі даних

Протягом останніх років було запропоновано кілька транспортних протоколів для багатопроменевих розширень [RFC6824], [MPRTP], [SCTPCMT]. Multipath TCP [RFC6824] є найбільш зрілим. Він вже використовується на популярних смартфонах та інших випадках використання [RFC8041].

Протокол MP-QUIC (Quick UDP Internet Connections) - абсолютно новий експериментальний інтернет-протокол, розроблений Джимом Роскіндом в Google,який поєднує в собі функції HTTP/2, TLS та TCP безпосередньо через UDP, з метою зменшення латентності зв'язку між клієнтом і сервером. [13] Перехід до UDP - найбільш цікава і потужна особливість протоколу, з якої випливають деякі інші особливості[14].

QUIC дозволяє створювати з'єднання з набагато меншою затримкою, він вирішує проблему втрати пакетів, які блокують тільки один порушений потік, замість всіх, як це відбувається в HTTP/2 і дозволяє легко встановлювати з'єднання з різних мережевих інтерфейсів - тим самим також закриваючи області, для яких застосовувався MPTCP.

MPQUIC має ряд переваг:

1. Можливість використовувати різні шляхи, які існують між клієнтом і сервером. Сьогоднішні мобільні пристрої, такі як смартфони, мають кілька безпровідних інтерфейсів, і користувачі можуть легко їх об'єднати.

2. Multipath може забезпечити кращу агрегацію з QUIC, ніж TCP (MPQUIC на 13% швидший у порівнянні з MPTCP).

3. MPQUIC краще справляється з втратами пакетів, ніж MPTCP.

4. Приведення Multipath в QUIC є досить простим.

5. Безперервна передача мережі.

Обмеження MPQUIC

Але є деякі обмеження в використанні MPQUIC:

1. QUIC ще не стандартизовано. Перша версія протоколу QUIC буде зосереджена на базовому сценарії: клієнт, буде підключатися до сервера по одному шляху, для однієї програми, HTTP.

2. Обмежена кількість сценаріїв.

3. Існують деякі проблеми з безпекою.

4. Потребує вже встановлених з'єднань за допомогою різних бездротових або кабельних технологій.

MPTCP(Multipath TCP) - це набір розширень специфікації протоколу управління передачею (Transmission Control Protocol, TCP), який може ефективно використовувати кілька шляхів для даного з'єднання.[15,16] Досвід, накопичений за допомогою MultipathTCP, може бути використаний для пропозиції простих розширень, що дозволяють використовувати Quick UDP Internet Connection (QUIC) для ефективного використання кількох шляхів протягом усього терміну служби QUIC.

Протокол MPTCP (Multipath TCP) описаний в RFC 6824, став найновішим розширенням заслуженого протоколу TCP. TCP був створений тоді, коли у хостів був один мережевий інтерфейс і одна IP-адреса.За допомогою MPTCP клієнт може встановити кілька підключень до одного і того ж хосту призначення через різні мережеві адаптери. Це створює надійні і ефективні сполуки між хостами з використанням існуючих мережевих інфраструктур.

Multipath TCP має ряд переваг[17]:

- Multipath TCP, забезпечує зворотне мультиплексування ресурсів і тим самим збільшує пропускну спроможність TCP до суми всіх доступних на рівні каналів замість використання одного, як того вимагає простий TCP. Multipath TCP сумісний з простим TCP.
- Багатоканальний TCP особливо корисний у контексті бездротових мереж. Типовим випадком використання є Wi-Fi та мобільні мережі.
- Окрім збільшення пропускної спроможності за рахунок зворотного мультиплексування, посилання можуть бути додані або скинуті, коли користувач переміщується в зону охоплення або виходить за рамки, не порушуючи кінцеве TCP-з'єднання. Проблема передачі посилань таким чином вирішується за допомогою абстракції в транспортному шарі, без спеціальних механізмів на рівні мережі чи зв'язку. Функціональність передачі даних може бути реалізована на

кінцевих точках, не вимагаючи спеціальної функціональності в підмережах - відповідно до принципу Інтернету.

- Multipath TCP може збалансувати єдине TCP-з'єднання через кілька інтерфейсів і досягти дуже високої пропускної спроможності.

Обмеження MPTCP[16, 17]:

1. Погана взаємодія з короткими / малими потоками;
2. Брак інфраструктурної підтримки багатопроменевої політики;
3. Розширення MPTCP часто блокується проміжними пристроями.
4. Багатокористувацький PPP(Point-to-Point Protocol).

3.1.7. Визначення характеристик каналів

Обґрунтовано простий вираз для доступної смуги пропускання B_{av} = (W2-W1) / (D2-D1). Тому розрахунку цієї формули було проведено певну кількість експериментів за допомогою утиліти ping для визначення пропускної здатності по заданій формулі, та разом з тим порівнювалась пропускна здатність, виміряна за допомогою утиліти Iperf (табл. 3.1). Отримані результати свідчать про можливість застосування цієї формули.

Таблиця 3.1

Оцінка пропускної здатності каналів

Довжина W1	**Довжина W2**	**Затримка D1**	**Затримка D2**	**Пропускна здатність за формулою**	**Пропускна здатність, виміряна утилітою Iperf**
1330	1450	33	49	7.5	6.53
1330	1450	54	74	6.00	6.50
1330	1450	51	65	8.57	6.66
1330	1450	34	52	6.66	6.54

1330	1450	55	84	4.13	6.57
1330	1450	48	72	5.00	6.54
1330	1450	42	71	4.13	6.67
1330	1450	42	59	7.05	6.50
1330	1450	56	78	5.45	6.67
1330	1450	35	69	3.52	6.54
1330	1450	39	57	6.66	6.67
1330	1450	56	72	7.50	6.54
1330	1450	42	57	8.00	6.53
1330	1450	37	53	7.05	6.66
1330	1450	53	78	4.80	6.50
1330	1450	38	59	5.71	6.58
1330	1450	46	68	5.45	6.54
1330	1450	39	57	6.66	6.57
1330	1450	52	71	6.31	6.54
1330	1450	42	58	7.50	6.66

Рис. 3.9. Графічне представлення отриманих результатів

Для 100 Мбіт-ного каналу дані приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Оцінка пропускної здатності каналів

Довжина W1	**Довжина W2**	**Затримка D1**	**Затримка D2**	**Пропускна здатність за формулою**	**Пропускна здатність, виміряна утилітою Iperf**
1330	1450	5	7	60	62,2
1330	1450	6	8	60	61,6
1330	1450	6	8	60	62,7
1330	1450	4	6	60	63,0
1330	1450	4	7	40	61,3
1330	1450	2	4	60	61,2
1330	1450	4	6	60	61,7
1330	1450	3	5	60	61,6
1330	1450	3	5	60	61,5
1330	1450	4	6	60	62,7
1330	1450	3	5	60	61,6
1330	1450	5	7	60	61,2
1330	1450	3	6	40	61.1
1330	1450	4	6	60	61,2
1330	1450	5	7	60	61,2
1330	1450	6	8	60	61,6
1330	1450	4	6	60	62.5
1330	1450	3	5	60	61,6
1330	1450	4	7	40	61,2
1330	1450	5	7	60	61,7

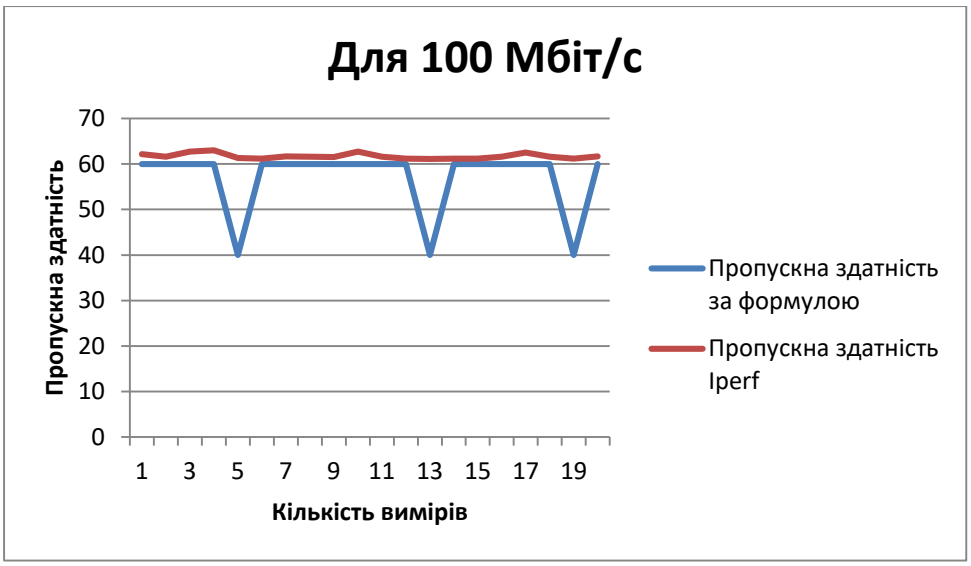


Рис. 3.10. Графічне представлення отриманих результатів

3.2. Методи підвищення енергоефективності підсистем БС

Важливим завданням стає зниження операційних витрат на експлуатацію мережі, в яких найбільш значна частина припадає на електропостачання (40-50% від загальних витрат на експлуатацію системи базових станцій). Для базових станцій, розміщених у важкодоступних і віддалених місцях, частка цих витрат ще вище, тому що потрібно або будувати протяжні лінії електропередач, або використовувати автономні джерела енергії (зазвичай дизельні генератори) [18].

На сумарне енергоспоживання базової станції впливає безліч факторів. В [19] наведені результати дослідження енергоспоживання 95 базових станцій в Італії. Середньорічне енергоспоживання однієї станції склало 35300 кВтг, що відповідає середній потужності приблизно в 4 кВт. При цьому середнє енергоспоживання базових станцій стандарту UMTS (приблизно 3 кВт) трохи нижче, ніж для стандарту GSM (4.5 кВт), що обумовлено різною вихідною потужністю передавачів.

Енергоспоживання конкретної базової станції сильно залежить від складу устаткування. Енергоспоживання базової станції залежить також від ряду зовнішніх чинників. Коливання температури зовнішнього повітря призводять до зміни навантаження на систему охолодження. Амплітуда коливань

енергоспоживання при цьому відповідає потужності кондиціонера, що входить в систему охолодження (від 0.8 до 2 кВт). Пік енергоспоживання припадає на сонячні літні дні. Система енергопостачання повинна забезпечувати необхідний запас потужності для проходження цього піку. Енергоспоживання слабо залежить від способу розміщення станції (контейнер, приміщення) [19]. У разі сучасних станцій, обладнаних системами енергозбереження, споживана потужність залежить також від числа активних абонентів, детально питання розглянуто в [20].

Виділяються два основних, хоча і тісно пов'язаних між собою, напрямки: зниження енергоспоживання базової станції і використання альтернативних джерел електроенергії. У міру зниження енергоспоживання базової станції, застосування альтернативних джерел енергії стає все більш виправданим, проте в цілому ніша їх застосування залишається сильно обмежена [19, 20].

3.2.1. Зниження енергоспоживання базової станції

Виділяється кілька шляхів зниження енергоспоживання.

- Оновлення застарілого обладнання [20].
- Системи динамічного енергозбереження (Dynamic Energy Saving, Power Saving Mode).
- Виносні радіоблоки і розподілені антенні системи.
- Удосконалення допоміжних систем.

3.2.2. Використання альтернативних джерел енергії

Альтернативне джерело енергії - спосіб, пристрій або споруда, що дозволяє отримувати електричну енергію (або інший необхідний вид енергії) з енергії поновлюваних або практично невичерпних природних ресурсів і явищ і тих, які замінюють собою традиційні джерела енергії. Відповідно, альтернативна енергетика включає різні групи технологій:

- нетрадиційна гідроенергетика (мікроГЕС[21], приливні ГЕС і т.д.),
- вітроенергетика[22,23],

- сонячна енергетика (фотоелектричні елементи[24], сонячні колектори [25]),

- біопаливо[26,27],

- геотермальна енергетика[28].

- Спільне використання вітроустановок і фотоелектричних елементів [29].

Для оцінки доцільності використання тих чи інших напрямків було розроблено модель, яка включає економічну складову, зокрема змінними будуть капітальні та операційні витрати на забезпечення енергією підсистеми БС:

$$T = FC + VC,$$

де FC - *fix* фіксовані витрати, VC - змінні витрати.

$FC = FC_{сис.енерг.БС} + \sum_{i=1}^{N} FC + FC_{сис.БС} + FC_{сис.БЖ}$, де $FC_{сис.енерг.БС}$ - система енергетичного живлення БС; $FC_{сис.БС}$ - вартість системи відновлюваної енергії; $FC_{сис.БЖ}$ -вартість системи безперебійного живлення.

$VC = W \cdot C_w \cdot t = E_{ет} \cdot C_w \cdot t$, де W - споживана потужність, t -час споживання, C_w - вартість 1 Вт енергії із електромережі.

$$C_{ем.} = F_{сис.енерг.БС} + \sum_{i=1}^{N} FC_{сис.БС} + F_{сис.БЖ} + E_{ем.} \cdot C_w \cdot t$$

Енергетична ефективність визначається наступним чином:

$$E_{ef} = \frac{R}{E_{BS}},$$

де R - швидкість передавання даних в стільнику; $R = F \cdot \beta$, де F - виділена смуга частот; β - спектральна ефективність.

$$E_{total} = E_{BS}$$

$$E_{BS} = E_{ем} + E_{відм}$$

$$E_{відм} = \sum_{i=1}^{N} E_{відм},$$

де N - кількість відновлювадьних джерел енергії.

На дану модель накладається обмеження по максимальному радіусу стільника $d_{\max}$. Коефіцієнт використання відновлювальних джерел.

$$\lambda = \frac{E_{відн}}{E_{BS}} = \frac{E_{відн}}{E_{відн+}E_{BS}} = 1 - \frac{E_{BS}}{E_{відн} + E_{BS}}$$

Тоді задача оптимізації буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} d = d_{\max} \\ \lambda \to \max \\ E_{ef} \to \max \end{cases}$$

Дана модель дозволяє підвищити енергетичну ефективність підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку.

3.2.3. Динамічне регулювання вживаної потужності мережі

Динамічне регулювання вживаної потужності мережі - це інтелектуальний спосіб знизити енергоспоживання мережі. Завдання полягає в зниженні потужності мережевого елемента у разі зміни навантаження у мережі, що може бути зроблено за рахунок відключення малих стільників та точок доступу Wi-Fi або зниження швидкості передачі даних у сайті. Ключові підходи до керування тригерами вимкнення/увімкнення стільників та APWi-Fi:

- розподілений підхід, який не вимагає залучання OAM;
- централізований підхід, тобто, центральна система управління OAM (SON) відповідає за диспетчеризацію мережі і за її режим роботи;
- гібридна архітектура поєднує розподілені і централізовані підходи.

Зазвичай більш функціональним є варіант впровадження гібридної архітектури мережі SON, проте він не є оптимальним. Його реалізація вплине на показники CAPEX, OPEX та значно ускладнить архітектуру гетерогенної мережі. Тому пропонується впровадження централізованої системи SON. У централізованій OAM-системі eNB буде інформувати, наприклад, через кожні 5 хв. про поточну ситуацію з навантаженням. Остаточне рішення для відключення проводиться системою OAM. Перевага централізованої системи очевидна - OAM має повну картину всіх стільників у мережі. У гібридній архітектурі eNB можуть самостійно виходити/входити у сплячий режим. У разі, якщо QoS не досягає зазначеного рівня за рахунок активного макрорівня, можуть бути активовані

мікростільники. Повне відключення мікростільника в періоди низького навантаженням або відсутності навантаження можливе, оскільки покриття підтримується макрорівнем. OAM визначає навантаження на мікростільник та приймає рішення, щодо його відключення. Після цього мікростільник вже не може аналізувати навантаження у його радіусі покриття. Тому задача ввімкнення мікростільника стає важливим питанням. Для цього використовуються такі методи: згідно статистичних даних встановлюється час включення та відключення стільника; всі стільники включені, режим відключення стільника заборонено; сплячий режим; мікростільники вмикаються з певною частотою.[30]

Таким чином, AP володіє більшим пріоритетом для UE, завдяки більш високої пропускної здатності та більш низької вартості трафіку у порівнянні з мережею LTE. Якщо UE знаходиться у зоні покриття декількох AP, то OAM буде обирати AP виходячи з таких показників, як вартість та продуктивність, враховуючи при цьому розподіл навантаження.

У процесі позиціонування, коли UE наближається до БС, її потужність зменшується і виникає проблема електромагнітної доступності по висхідній лінії від UEдо ВП, що в свою чергу суттєво зменшує точність позиціонування. Для цього пропонується використовувати алгоритм примусового виведення на максимальну потужність передавача UEна короткий проміжок часу.

Процедура позиціонування абонентської станції засобами пеленгаційної мережі. Вимірюваними параметрами є кути напрямку приходу випромінювання UEщодо лінії (бази), що з'єднує два ВП мережі.

Вимірювальні пункти пеленгаційної мережі розташовуються в позиційних районах базових станцій (eNB) і мають у своєму складі приймачі LTEта антенні пристрої, що є прийомними фазованими антенами решітки (ФАР) з електронним управлінням. Управління та обробка результатів роботи пеленгаційної мережі проводиться в спеціальному пульті управління, який взаємодіє з контролерами і системою комутації мережі мобільного зв'язку.[30]

Отже, підведемо підсумки, щодо алгоритму динамічного регулювання потужності. Допустимо, що A=(a1,..,an), B={b1,..,bn} та C={c1,..,cm} - це APWi-Fi,

та HeNB та eNB відповідно. При цьому m=1, або значно менше за n, так як множина точок доступу розгортається в середині зон покриття мобільної мережі. ОАМ зберігає список A, B та C, як список можливих кандидатів для підключення, також зберігає інформацію щодо завантаженості кожного з них. U={u1,..,uk} - це АС. Кожний АС вимагає підключення, кожна АР та HeNBабо eNBможуть забезпечити певну максимальну пропускну здатність *(Ymacro_max, Ymicro_max, Ywifi_max).*Таким чином, після знаходжєння точного місця знаходжєнняабонента у мережі, відбувається визначення способу підключення абонента у мережу, це може здійснитися через макростільник, мікростільник та APWi-Fi. Пріоритетним є підключення абонента до АР, це відбувається, якщо абонент знаходиться у зоні покриття АР, та на пристрої, з якого здійснюється запит на підключення до Інтернету, увімкнений модуль Wi-Fi. Якщо абонент підключився через АР Wi-Fi, то перераховується навантаження на АР Wi-Fi, якщо ж ні, то перевіряється можливість підключення до мікростільника. За умови, що абонент знаходиться у зоні покриття мікростільника і на нього вистачає пропускної здатності, абонент підключається до мікрорівня. У іншому випадку абонент підключається до макростільника. Тепер залежно від навантаження на макрорівень розраховується необхідну зону покриття мікростільника:

$R_{micro} = R_{max} (Y_{micro} / Y_{micro_max})$

де R_{max} - максимальний радіус зони покриття мікростільника, R_{micro}- розрахований необхідний за даним навантаженням на мережу радіус зони покриття стільника, Y_{micro}- навантаження на мікростільник у даний момент, Y_{micro_max}- максимальна пропускна здатність мікростільника. Таким чином, радіус зони покриття стільника залежить від поточного навантаження на мережу.

Задля спостереження ефективності гетерогенних мереж створено імітаційну модель. Модель забезпечена сучасним графічним інтерфейсом та використовує мову програмування Javascript. Модель дозволяє змінюючи конфігурацію мережі досліджувати зміну пропускної здатності мережі, її завантаження, кількість абонентів, що обслуговуються. Також модель реалізує алгоритм динамічного регулювання потужності мікростільника. Моделювання проводиться для умов

міста, для місць, де спостерігається перевантаження мережі, внаслідок великої кількості абонентів. Вхідні дані моделі: радіуси, споживані потужності, максимальні пропускні здатності макростільника, мікростільника та АР.[30]

Моделювання проводиться для діапазону 1800 МГц, для умов міста, для яких найбільш підходить модель згасання сигналу Cost231-Hata. Радіуси макро- та мікросот розраховуються з обліком основних витрат сигналу на трасі:

$L_H = 69{,}55 + 26{,}26\lg(f) - 13{,}87\lg(h) - a\{h_n\} + [44{,}9 - 6{,}55\lg(h)] \cdot \lg R,$

де f - частота, МГц; h_b- висота антени базової станції, м; d- відстань від передавача до приймальника, км; $a(h_m)$- поправочний коефіцієнт:

$a(hm) = (1{,}1\lg(f) - 0{,}7) - hm - (1{,}56\lg(f) - 0{,}8).$

Стани мережі при моделюванні:

- працює лише макростільник;
- працює макростільник та одна/дві мікростільники (режим динамічного регулювання вимкнено/увімкнено);
- працює макростільник, одна/дві мікростільники та точки доступу Wi-Fi(режим динамічного регулювання вимкнено/увімкнено).

Для стану, коли працює макростільник, спостерігається перевантаження макрос тільника. Це означає, що частин абонентів отримають відмову у доступі до мережі. Для стану, коли працює макростільник та два мікростільник, макромережа розвантажилась, та ємність сайта значно зросла. Але незначне перевантаження одного мікростільника також може призвести до відмови доступу до Інтернет. При вмиканні АР Wi-Fi всі абоненти забезпеченні якісним зв’язком, імовірність відмови у з’єднанні значно знизилась. Зростання пропускної здатності в 2 рази призводить до непомірного зростання споживаної потужності стільниками. Але мережа мікростільників не завантажені, мережа в цілому працює не ефективно. Для вирішення цієї проблеми застосовується алгоритм динамічного регулювання споживаної потужності мікростільниками. Результати моделювання наведено на рис. 3.11., 3.12.[30]

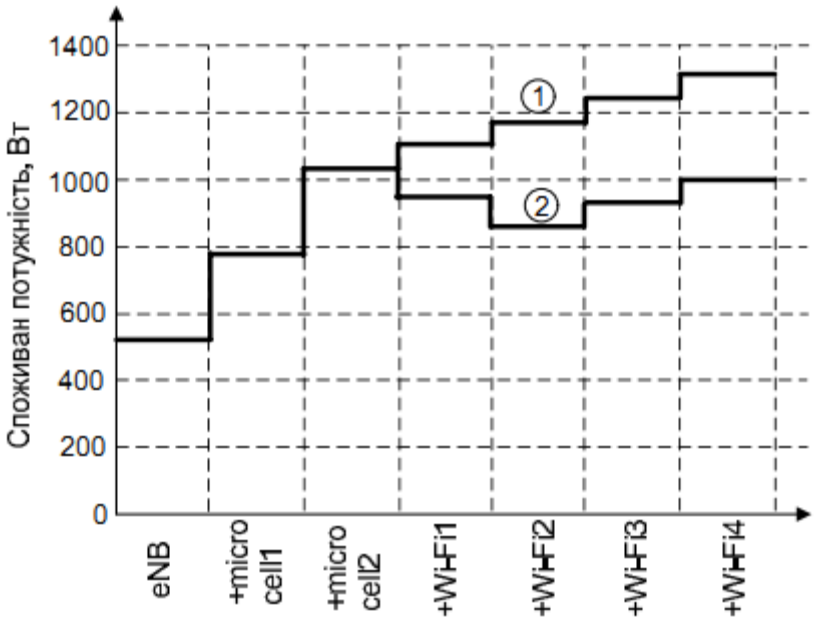


Рис 3.11 Залежність споживаної потужності мережі залежно від її стану: 1 - режим динамічного регулювання мікростільника вимкнений, 2 - увімкнений)

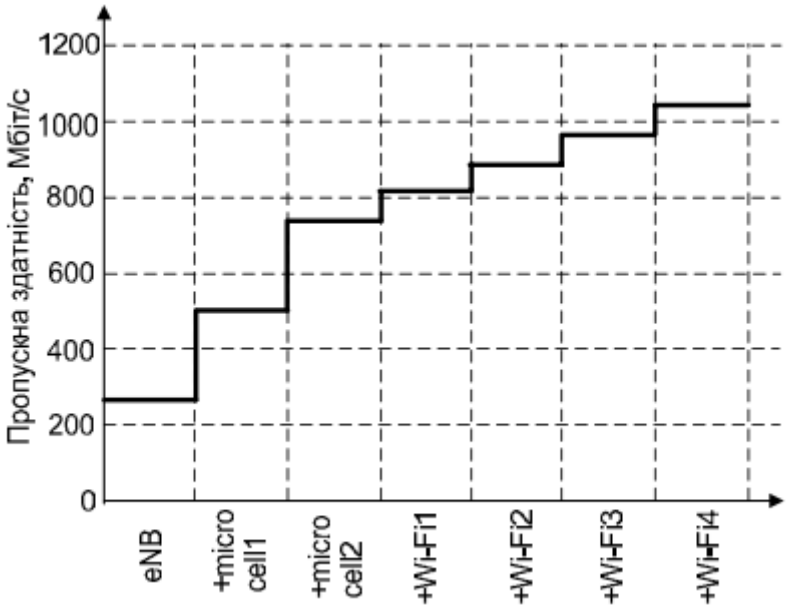


Рис. 3.12 Залежність пропускної здатності мережі від її стану

Висновки до розділу 3

Цей розділ присвячено підвищенню ефективності підсистем базових станцій. Тому був запропонований метод розвантаження радіомережі і паралельного використання декількох каналів, а саме технологія Wi-Fi Data Offload, яка націлена на розвантаження операторської мережі від трафіку передачі даних за допомогою Wi-Fi.

Проведено аналіз технології багатоканальної передачі даних Multilink, за допомогою якої, клієнт може одночасно використовувати декілька ліній зв'язку для доставки контенту. Визначено основні процедури встановлення з’єднаннядля архітектури 5G .

Проведено аналіз ефективності передачі даних з використанням протоколу багатоканальної маршрутизації - MP-TCP, за допомогою якого, клієнт може встановити кілька підключень до одного і того ж хосту призначення через різні мережеві адаптери. На смартфонах Multipath TCP комбінує стільникові мережі та мережі Wi-Fi, підвищуючи пропускну здатність і прискорюючи роботу додатків, чутливих до затримки.

Також був розглянутий протокол MP-QUIC, який поєднує в собі функції HTTP/2, TLS та TCP безпосередньо через UDP, з метою зменшення латентності зв'язку між клієнтом і сервером.

Запропоновано метод підвищення енергоефективності підсистеми базових станцій. Вирішено, що для зниження енергоспоживання потрібно перш за все оновити застаріле обладнання, використовувати виносні радіоблоки і розподілені антенні системи. Також можна використовувати системи динамічного енергозбереження, які дозволяють відключати або переводити в режим енергозбереження невикористовувані модулі базових станцій. Використання альтернативних джерел енергії дозволить отримувати електричну енергіюз енергії поновлюваних або практично невичерпних природних ресурсів і явищ і тих, які замінюють собою традиційні джерела енергії.

Список використаних джерел

1. Александр Кашель/Wi-Fi Data Offload:технология «разгрузки» сетей мобильного доступа//Сети и телекоммуникации–2014.– № 1-2– С.48-53.

2. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Стецюра Ю.І.Розвантаження радіоінтерфейсу мережі LTE шляхом застосування концепції Hotspot 2.0.// Інформаційні системи–Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. – Житомир: ЖВІ ДУТ, 2014. – Вип. 17. – С.63-70.

3. Кануннікова К.П., Червинський В.В. Алгоритм динамічного регулювання споживаної потужності мікростільниками гетерогенної мережі LTE. // Обчислювальна техніка та автоматизація – 2014. – №1–С.126-133.

4. What is small cell?[електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу:https://www.ciena.com/insights/what-is/What-Is-Small-Cell.html

5. Small cells[електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу:https://www.ericsson.com/en/networks/offerings/small-cells

6. Femtocell[електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу:https://searchtelecom.techtarget.com/definition/femtocell

7. Фемтосота[електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу:https://gsm-repiteri.ru/femtosota

8. Wi-Fi [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi

9. Зюбіна Р. В., Юдін О. К. Аналіз основних технологій керування мобільністю в бездротовому зв'язку/ Наукоємні технології – 2015 –№2(26) – С. 172-178.

10. LTE Wi-Fi Data Offload [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://hsc.com/portals/0/uploads/articles/ltewifidataoffload635363499367960016.pdf

11. Разгрузка сетей мобильной связи за счет перенаправления трафика данных в Wi-Fi сети. Решения компании Proxim Wireless. [електронний ресурс] –

електронні текстові дані – режим доступу: http://winncom.ru/wp/wp-content/uploads/Winncom_3G_OFFLOAD_Proxim.pdf

12. What Is Multilink IP (ML-IP)? [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://www.multipath-tcp.org/

13. Quentin De Coninck, Olivier Bonaventure Multipath QUIC: Design and Evaluation - CoNEXT '17 – abstracts. – Incheon, Republic of Korea, 2017.

14. R. Hamilton et al. 2016. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. (July 2016). Internet draft, draft-hamilton-quic-transport-protocol-00

15. O. Bonaventure and S. Seo. 2016. Multipath TCP Deployments. IETF Journal (November 2016).

16. D. Wischik, C. Raiciu, A. Greenhalgh, and M. Handley. 2011. Design, Implementation and Evaluation of Congestion Control for Multipath TCP.. In NSDI'11.

17. Xiuli Hu, Pangbei Hong and Bing Li. Benefit of Multipath TCP on the Stability of Network // Computer Science. Networking and Internet Architecture, 2015.

18. Емельянов А.К. Пути повышения энергоэффективности подсистем базовых станций сетей сотовой связи./ Интернет-журнал «Науковеденение» – 2013 – №4 – С.1-12.

19. Lubritto C. Telecommunication power system: energy saving, renewable sources and environmental monitoring//Trends in Telecommunications Technologies. – InTech,2010. – P.145-164.

20. Lorincz J., Garma T., Petrovic G. Measurements and modeling of base station power consumption under real traffic loads//Sensors. – 2012. –№12. – P.4281-4310.

21. Лукутин Б.В. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций/Б.В. Лукутин, С.Г.Обухов, Е.Б. Шандарова – моногр. Томск–2001–101с.

22. Дослідження тенденцій розвитку вітроенергетики в Європі і в Україні С. Кудря, Б. Тучинський, В. Дресвянніков, З. Рамазанова /Вітроенергетика України. – 2004. – № 1–2. – С.4–7.

23. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: http://energetika.in.ua/ua/

24. Фотоэлектрические элементы и модули: история, принцип действия, технологии, применение [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://magus.com.ua/a144153-fotoelektricheskie-elementy-moduli.html

25. Енергозбереження і енергоефективність-1. Конспект лекцій для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи». - К.: НТУУ “КПІ”, 2014. – 106 с.

26. Панченко А.В. Биотопливо как альтернативный источник энергии// энергобезопасность в документах и фактах. – 2007– №6(18) – С.14-18.

27. Панцхава Е.С. Биоэнергетика – самостоятелльная часть современной энергетики//Биоэнергетика. – 2007. – №1– С.17-25.

28. Геотермальна енергія [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://alternative-energy.com.ua/geothermal-energy/

29. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие/ Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 128 с.

30. Полігенько О.О., Методи оптимізації підсистеми базових станцій 4-го покоління, 2014.

РОЗДІЛ 4
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ОПЕРАТОРІВ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Даний розділ повністю присвячений узагальненню отриманих наукових та практичних результатів та розробці нової інформаційної технології підвищення ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку.

На базі нової інформаційної технології також планується розробка відповідного алгоритмічного та програмного забезпечення для планування більш ефективної підсистеми базових станцій операторів стільникового зв'язку.

4.1. Розробка інформаційної технології

Інформаційна технологія – це процес, який використовує сукупність методів та засобів для обробки та переказу даних задля отримання інформації нової якості про стан об’єкту, процесу або явища. Пропонується інформаційна технологія (ІТ) синтезу оптимальної архітектури підсистем БС, яка включає в себе різні моделі та методи синтезу структури підсистем БС, що у результаті дозволяють підвищити ефективність підсистем базвових станцій (рис. 4.1).

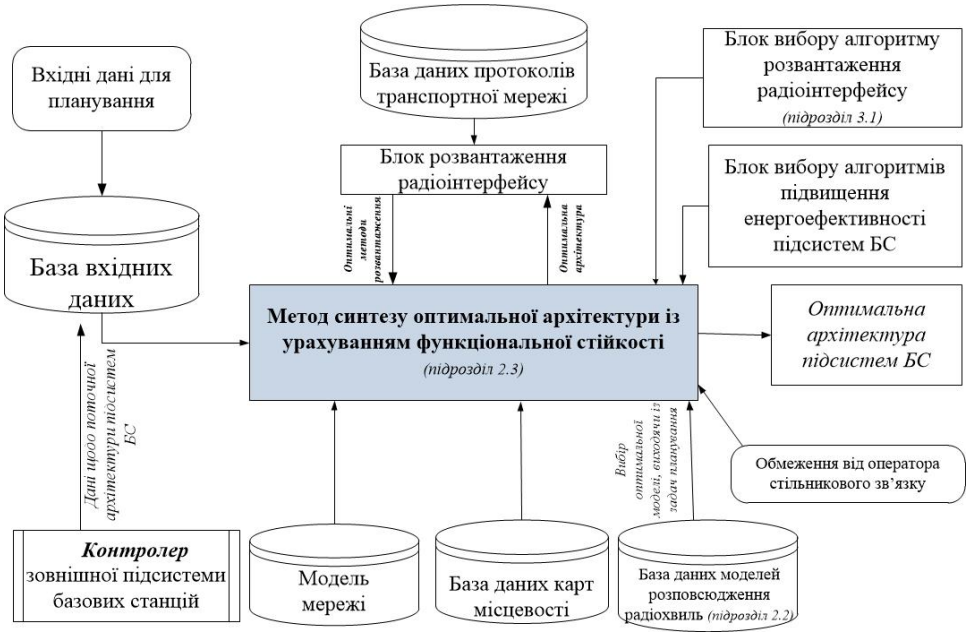


Рис. 4.1. Узагальнена структура розробленої інформаційної технології

Підвищення ефективності підсистем базових станцій може поліпшити і розширити якість виконання функцій базових станцій по забезпеченню стільникового зв'язку, підвищити надійність базової станції при експлуатації і функціональність окремих її елементів, а також дозволить знизити витрати на обслуговування і ремонт при роботі в мережі.

Процес побудови ІТ

1. Розглянути проблеми, що можуть виникнути в мережах стільникового зв'язку.

У першому розділі було детально проаналізовано архітектуру сучасних стільникових мереж, а саме 4G та 5G, а також розглянуто технологічні проблеми, які можуть виникнути в цих мережах. Серед них є проблеми, що пов'язані з недостатньою функціональною стійкістю. Забезпечення функціональної стійкості необхідно виконувати з урахуванням скорочення часу на обробку інформації і прийняття рішень, а також подальшого ускладнення математичних моделей розрахункових завдань з обробки інформації.

2. Запропонувати метод розв'язання проблеми, що пов'язана з синтезом оптимальної структури підсистем БС.

В п.2.1 визначається проблема синтезу оптимальної структури підсистеми базових станцій. Виходячи з цього, вирішуються дві нерозривно пов'язані задачі: планування мережі (попереднє і детальне) та оптимізація мережі (перепланування за результатами експлуатації).

3. Провести вибір обладнання.

В п. 2.2 проводиться вибір обладнання для проектування мережі LTE та проводиться оцінка бюджета втрат і зони покриття, так як збільшення смуги частот каналу призводить до зменшення допустимих втрат розповсюдження.

4. Розглянути метод вирішення задачі синтезу підсистеми БС.

В п. 2.4 наводиться математична модель задачі та методологія побудови функціонально-стійких підсистем БС.

5. *Провести вибір і обгрунтування математичної моделі підсистеми БС.*

В цьому підрозділі визначаються елементи підсистеми, що впливають на функціональну стійкість. Таким чином, математичною моделлю для дослідження функціональної стійкості підсистем базових станцій є неорієнтований граф з абсолютно надійними вершинами і ненадійними ребрами. Тому, підсистема базових станцій була представлена у вигляді саме неорієнтованого графу.

6. Визначити метод розвантаження радіомережі і паралельного використання декількох каналів

В п. 3.1 визначена технологія Wi-Fi Data Offload, яка націлена на розвантаження операторської мережі від трафіку передачі даних за допомогою Wi-Fi.

Також запропоновано метод підвищення енергоефективності підсистеми базових станцій. Вирішено, що для зниження енергоспоживання потрібно перш за все оновити застаріле обладнання, використовувати виносні радіоблоки і розподілені антенні системи.

Можливе виділення чотирьох основних етапів для оптимальної архітектури з урахуванням функціональної стійкості та підвищення її ефективності (рис. 4.2).

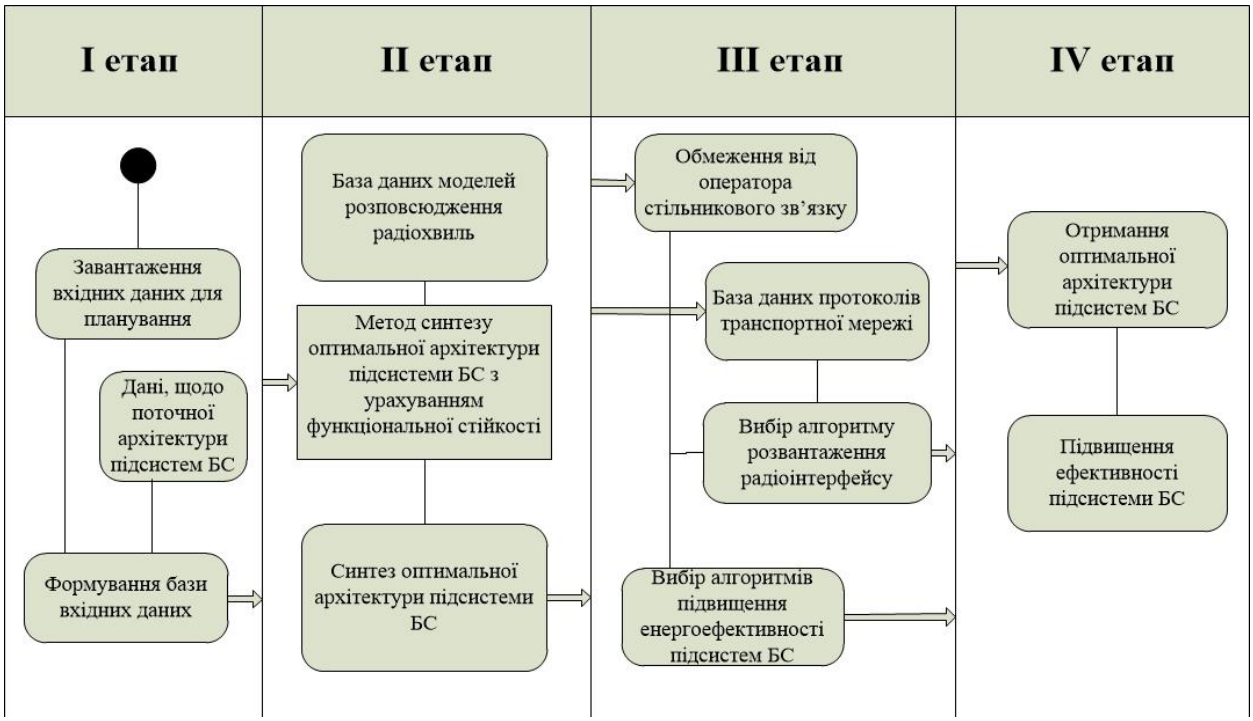


Рис. 4.2. Поетапна робота розробленої інформаційної технології

Перший етап: На цьому етапі формується база вхідних даних. Для цього, в неї завантажуються вхідні дані для планування мережі та дані щодо поточної архітектури підсистем БС, які надходять з контролера зовнішньої підсистеми БС.

Другий етап полягає у:

1.виборі моделі, виходячи із задач планування мережі, що надходять з бази даних моделей розповсюдження радіохвиль.

2. синтезі оптимальної архітектури підсистем БС.

Все це зводиться до методу синтезу оптимальної архітектури підсистеми БС з урахуванням функціональної стійкості. Дана методика складається з двох методик – методики загального синтезу мережі та методики часткового синтезу мережі. В якості критерію оптимізації прийнятий максимум функціональної стійкості підсистем базових станцій.

Третій етап:

Проводиться вибір алгоритмів розвантаження радіоінтерфейсу. А саме, технологія Wi-Fi Data Offload покликана розвантажувати мережі мобільних операторів від трафіку передачі даних за рахунок застосування технології Wi-Fi. В цьому випадку трафік передачі даних абонентів виводиться з радіомережі оператора в окрему радіомережу, що працює з використанням власних магістральних каналів. Також з'являється можливість надання абонентам послуг через партнерські мережі - аналогічно тому, як це робиться, коли абонент знаходиться в роумінгу

При цьому, застосовуються обмеження від оператора стільникового зв’язку.

Також проводиться вибір алгоритмів підвищення енергоефективності підсистем БС.

Виділяються два основних, хоча і тісно пов'язаних між собою, напрямки: зниження енергоспоживання базової станції і використання альтернативних джерел електроенергії. У міру зниження енергоспоживання базової станції, застосування альтернативних джерел енергії стає все більш виправданим, проте в цілому ніша їх застосування залишається сильно обмежена.

Четвертий етап полягає в отриманні оптимальної архітектури підсистем БС та саме підвищенні ефективності підсистеми БС.

4.2. Програмне забезпечення для планування ефектиної підсистеми базових станцій опреатора стільникового зв'язку

На базі розроблених методів, моделей та інформаційної технології було реалізовано програмне забезпечення для планування більш ефектиної підсистеми базових станцій опреатора стільникового зв'язку. Інтерфейс розробленого програмного забезпечення показаний на рис. 4.3.

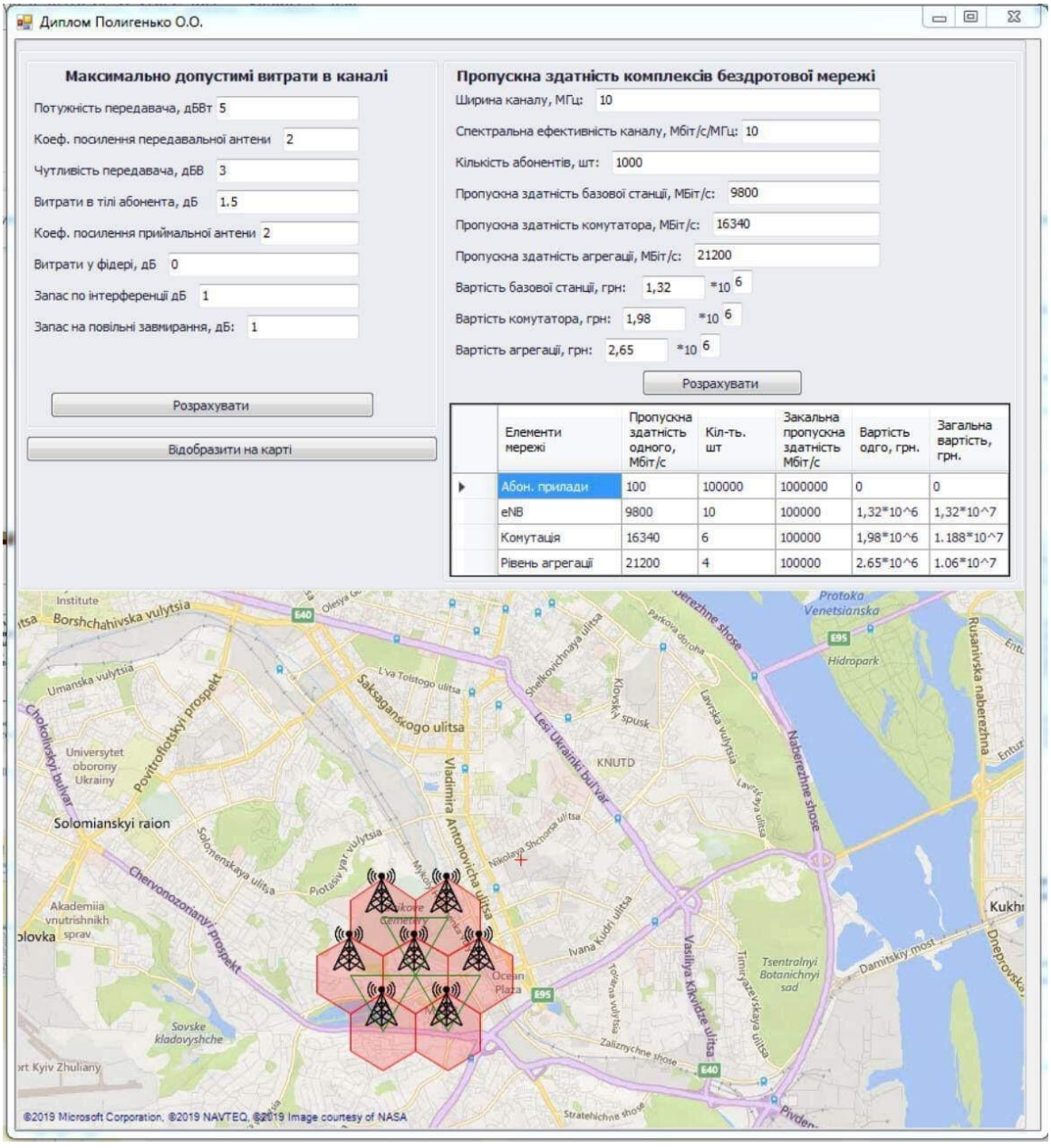


Рис. 4.3. Інтерфейс розробленого програмного забезпечення

Розглянемо розроблений програмний продукт. Для створення було використано наступне програмне забезпечення та сервіси:

- Draw.io;

- мова програмування C#.

Першим етапом в розробці програмного забезпечення було використано онлайн-сервіс Draw.io, за допомогою якого було розроблено схему роботи програмного забезпечення. В ході побудови схеми виникали певні складнощі. Одна з них – це візуалізація даних на мапі. Для вирішення цієї проблеми було проаналізовано цілу низку рішень, представлених на ринку, а саме: Google Maps Platform, Yandex Maps, Bing Maps, Navteq.

Перше представлене рішення – Google Maps Platform. Досить цікавий варіант, що має низку зручних рішень для розробників:

- Google Geocoding API – дозволяє конвертувати адресу у географічні координати та навпаки;

- getAddressComponents – надає детальну інформацію про вибране місце;

- Google Places API – надає можливість здійснювати пошук певних місць за допомогою зображення;

- Google Maps Driving Directions API – забезпечує направлення між вибраними координатами.

Друге рішення – Yandex Platform. Вищевказане рішення не використовувалось в зв’язку з неможливістю коректного використання сервісу на території країни.

Третє рішення – Bing Maps є не досить зручним для використання на території країн колишнього СНД.

До уваги було взято рішення на основі сервісу електронних мап – Navteq. З усіх вищевказаних пропозицій на ринку це рішення виявилось найкращим. Картографічна база даних компанії Navteq заснована на аналітичних даних з багатьох електронних (портативних) девайсів та пристроїв навігації в автомобілях за географічними об’єктами, а не на офіційних державних мапах. Вона надає дані, які використовуються в багатьох додатках. Одним з таких є автомобільна навігація

для багатьох німецьких автовиробників. Для прикладу: цей відсоток від загальної кількості ринку складає 85%. Також компанія Navteq співпрацює з іншими сторонніми агентствами і компаніями для надання своїх послуг для портативних GPS-пристроїв. Однією з таких компаній є Garmin.

На наступному етапі потрібно було обрати мову програмування. До розгляду було обрано дві мови програмування: Python та C#. Що стосується першого варіанту, то це рішення дозволило б з мінімальною кількістю рядків коду створити програму, яка була б оптимізована під більшість операційних систем, але враховуючи те, що на даний час більшість портативних комп'ютерів працюють на операційній системі Windows 7, 10, було обрано рішення створювати програмне забезпечення на мові C#. Також вагомим чинником слугувало те, що на більшості персональних комп'ютерів не встановлено програмне забезпечення Python і те, що в залежності від версії операційної системи, потрібно було інсталювати версію Python 3 або Python 2.7 та додаткові бібліотеки.

На третьому етапі потрібно було обрати програмне забезпечення для розробки зручного інтерфейсу кінцевому користувачеві. Базуючись на тому, що мовою програмування було обрано C#, для візуалізації було обрано інструмент DevExpress.

В ході створення схеми роботи програмного забезпечення виникла ідея колекціонування даних, які раніше обчислювалися. По-перше, це дасть змогу швидше обчислювати математичні формули, а у випадку, якщо значення раніше були введені до програми, вона одразу надасть результат. Для того, щоб не потрапити в пастку, розроблене програмне забезпечення перевірить не тільки значення підставлені для обчислення, а й перевірить відповідність місцевості. По-друге, у випадку, якщо здійснюються нові обчислення, а наша база даних має значення сот, які прилягають до місцевості, яку нам потрібно дослідити, то це, в свою чергу, дозволить надати користувачеві більш точні значення на перетині декількох сот. Для цього було обрано базу даних PostgreSQL – об'єктно-реляційна система керування базами даних, є альтернативою комерційним СКБД (Oracle Database, Microsoft SQL Server, IBM DB2).

На п’ятому етапі було завершено розробку схеми роботи програмного забезпечення.

Розглянемо принцип роботи програмного забезпечення. Спочатку ми розділимо наше програмне забезпечення на два вікна. В першому вікні ми будемо обчислювати максимально допустимі втрати в каналі та відображати їх на мапі, а в іншому вікні ми будемо обчислювати пропускну здатність комплексів бездротової мережі. Отриманий результат буде відображений в окремій табличці.

Розглянемо схему роботи обчислень максимально допустимих втрат в каналі (рис. 4.4).

Спочатку користувач задає свої параметри наступним полям: потужність передавача, коефіцієнт посилення передавальної антени, чутливість передавача, втрата в тілі абонента, коефіцієнт посилення приймальної антени, втрати у фідері, запас по інтерференції, запас на повільні завмирання, для подальшого обчислення.

Далі користувачеві необхідно виділити певну площу на мапі. Для цього потрібно натиснути на певну точку на мапі та, не відпускаючи кнопку маніпулятора, потягнути його донизу, щоб обрати частину мапи. На наступному етапі програмне забезпечення порівнює введені дані з даними, наявними у базі даних. У випадку, якщо результат для введених значень наявний, програма автоматично переходить до наступного етапу та відображає результат на мапі. У іншому випадку – програма здійснює обчислення і записує результат до бази даних, і потім переходить до відображення результатів на мапі.

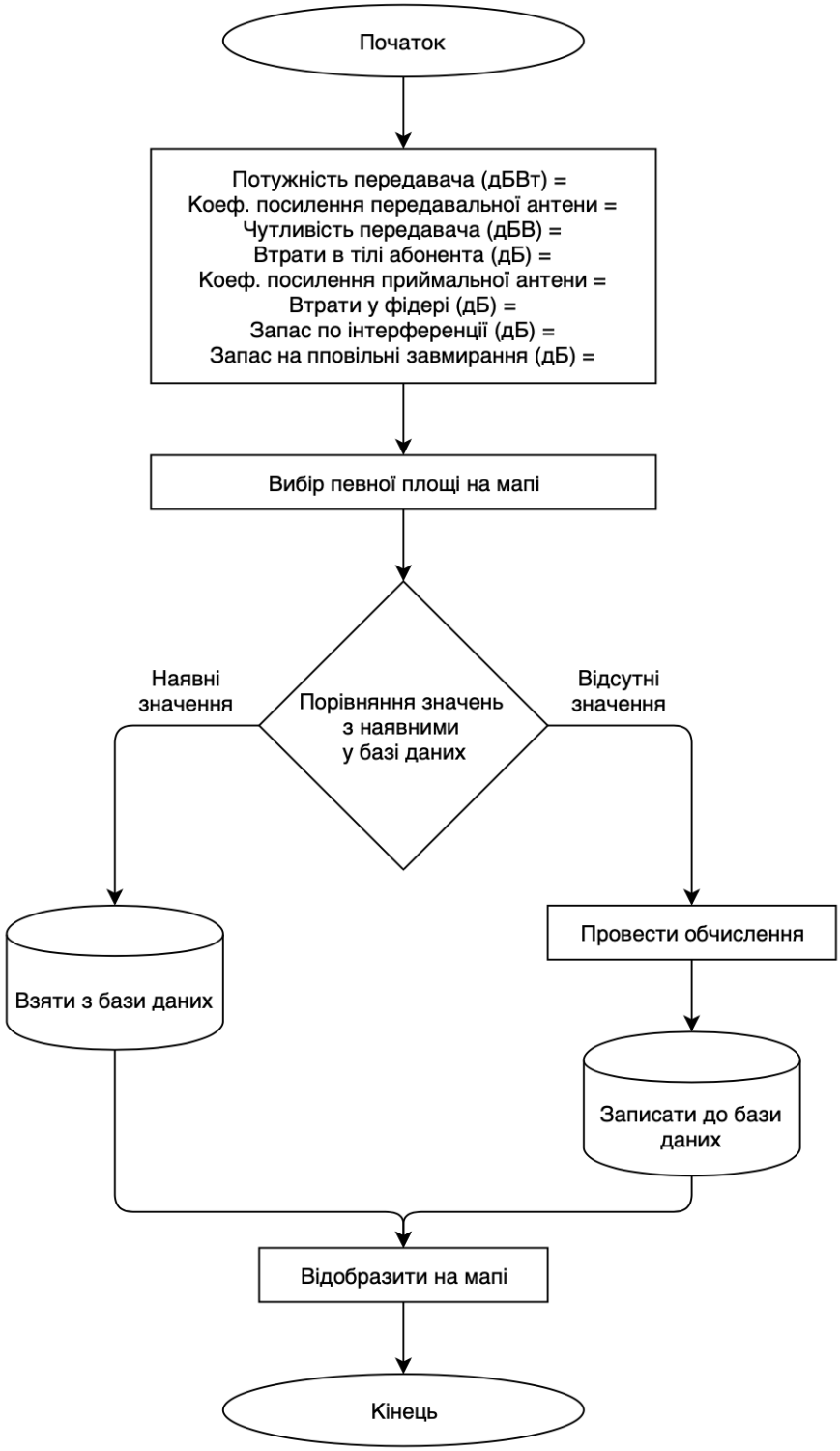


Рис. 4.4. Блок-схема алгоритму побудови зон обслуговування базових станцій

Тепер перейдемо до іншого вікна, в якому ми будемо здійснювати обчислювання пропускної здатності комплексів бездротової мережі (рис. 4.5).

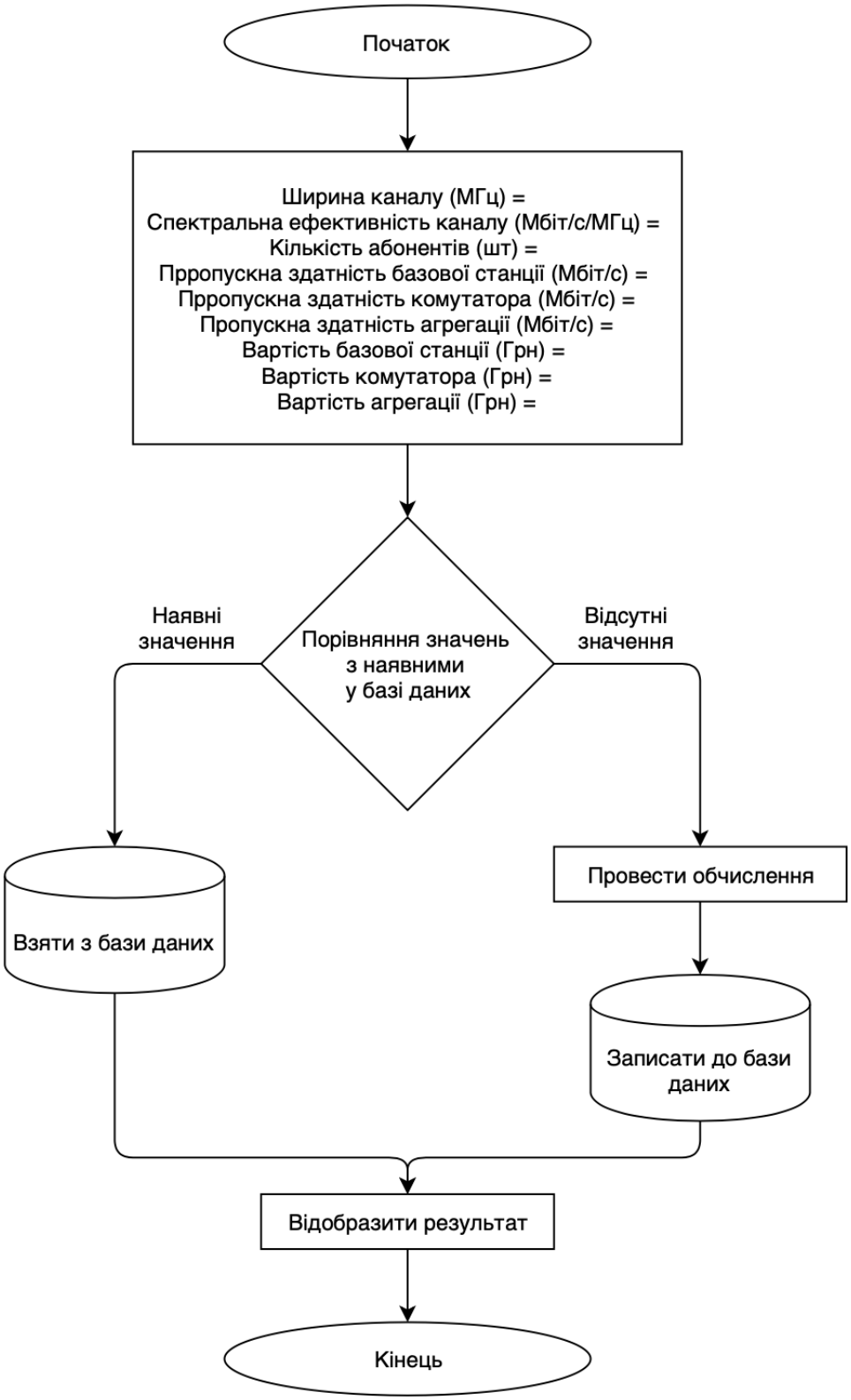


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритму оцінки пропускної здатності комплексів бездротової мережі

Для цього користувачеві потрібно задати свої параметри наступним полям: ширина каналу, спектральна ефективність каналу, кількість абонентів, пропускна здатність базової станції, пропускна здатність комутатора, пропускна здатність агрегації, вартість базової станції, вартість комутатора, вартість агрегації. На наступному етапі програмне забезпечення порівнює введені дані з даними наявними у базі даних. У випадку, якщо результат для введених значень наявний, програма автоматично переходить до наступного етапу та відображає результат. В іншому випадку – програма здійснює обчислення і записує результат до бази даних, і потім переходить до відображення результатів.

4.3. Програмне забезпечення для адаптивного підлаштування розміщення сонячних панелей для підвищення енергетичної ефективності базових станцій

Для підвищення енергетичної ефективності базових станцій було розроблено прилад та програмне забезпечення на базі Arduino. Це дозволить підвищити енергетичну ефективність базових станцій. Основною особливістю є те, що сонячна панель змонтована на спеціальну рухому платформу, на якій знаходяться фотоелементи, що вимірюють ефективність попадання сонячних променів та підлаштовують сонячну панель таким чином, щоб та збирала достатню кількість світла.

Для даного проекту було використано наступні елементи:

- Arduino UNO R3 CH340;
- сервопривід;
- друкована макетна плата MB-102 830 контактів;
- фоторезистор;
- сонячна панель;
- каркас металевий.

Наш прилад являє собою двохосьовий механізм, що рухається по координатам X та Y (рис. 4.6).

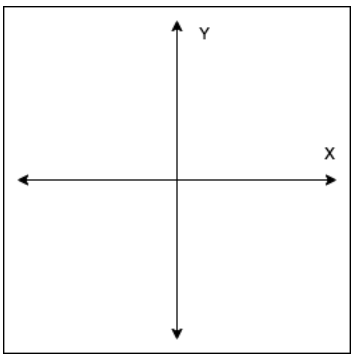


Рис. 4.6. Двохосьовий механізм

В подальшому ця властивість надасть нам можливість слідкувати за випромінюванням світла.

В нашому приладі ми будемо використовувати два методи:

Перший метод дозволить нам відстежувати сонячне світло у яскраві сонячні дні.

Другий метод буде працювати за завчасно запланованим розкладом.

Сонячне світло досить передбачуване явище. Скориставшись одним із веб-ресурсів, що надає інформацію про погодні умови, ми можемо бачити інформацію про схід та захід сонця протягом наступного року. Використавши математичний розрахунок для визначення кута сонця відносно місця розташування приладу, маємо змогу зробити наступний алгоритм роботи нашого приладу (рис .4.7).

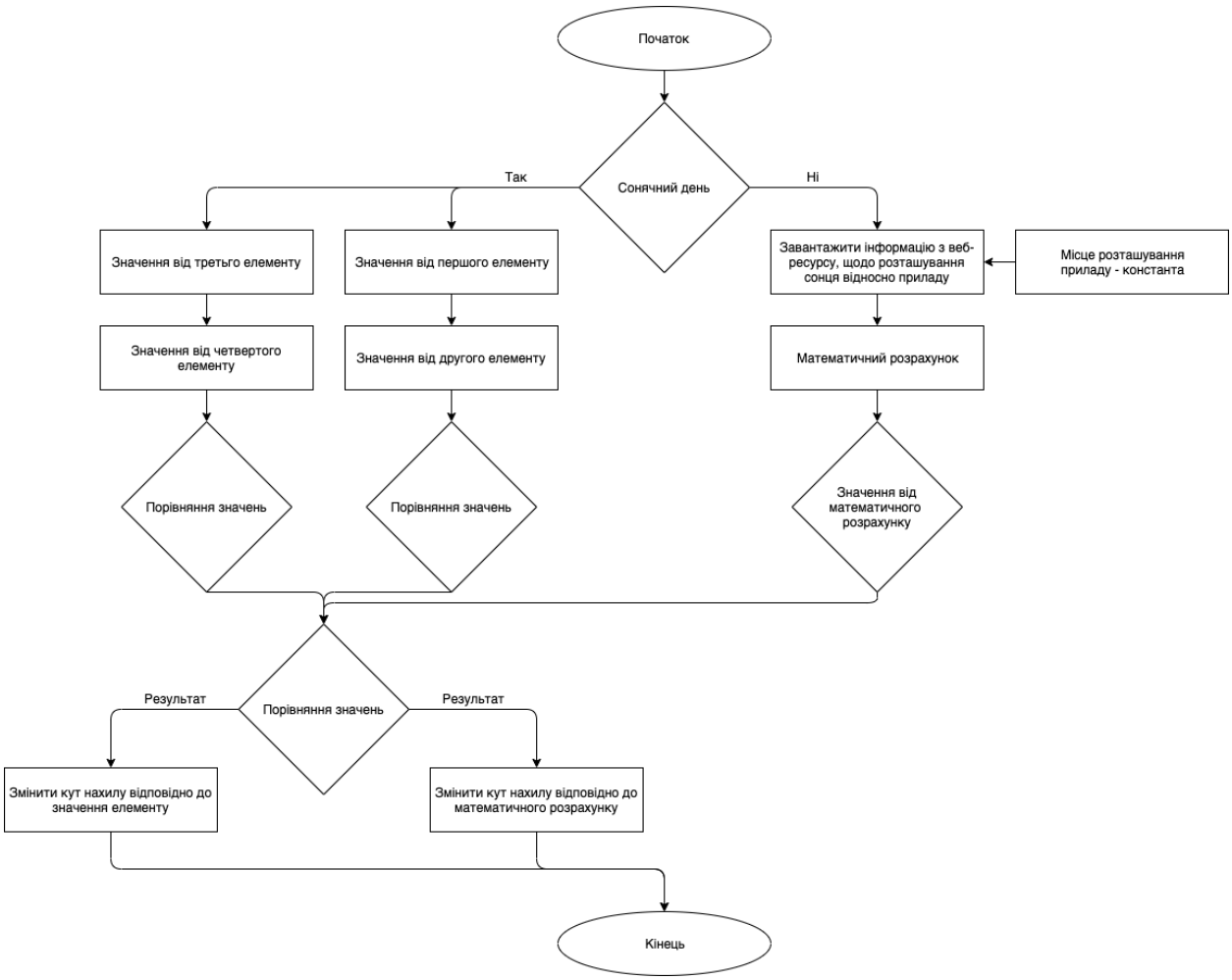


Рис. 4.7. Алгоритм роботи приладу

Другий метод дозволяє змінювати кут нахилу сонячної панелі в залежності від часу, дати та фізичного місцезнаходження. Він є досить ефективний, дозволяючи математично обґрунтувавши, що наша сонячна панель знаходиться у найбільш ефективному місці відносно сонячного світла у похмурий день.

Ми будемо використовувати чотири потужні резистори як датчики. Вони працюють наступним чином: в залежності від того, скільки світла на них потрапляє, елемент змінює свій опір. Чим більше світла на них потрапить, тим менший в них буде опір.

Наше програмне забезпечення буде працювати наступним чином: порівнюючи опір чотирьох елементів та в залежності від параметру, сервопривід буде переміщувати нашу платформу. Зауважу, що чутливість елементів залежить не тільки від самого елементу, а й від нашого програмного забезпечення. Для

більшої довговічності приладу в програмне забезпечення були внесені певні корективи таким чином, що наша сонячна панель має змогу переміщуватися тільки в межах певної визначеної області і з точно заданою швидкістю. Дані правки дозволять нам зменшити фінансову складову на обслуговування та ремонт даного приладу, що значно підвищує довговічність приладу.

Далі ми збираємо платформу для нашого приладу та за допомогою дротів під'єднаємо до неї сервоприводи, а їх, в свою чергу, дротами під'єднаємо до макетної плати та Arduino. Використовуючи безкоштовне програмне забезпечення, напишемо нашу програму.

Спочатку підключимо бібліотеку <Servo.h>.

```
#include <Servo.h>
```

Далі нам потрібно задати умови для сервоприводу. Хочу зауважити, що значення за замовчуванням дорівнює 90°. Ми змінюємо це значення на максимально допустиме 180°.

```
s_h;    // Максимальне горизонтальне значення
word h_d, h_d_lh, h_d_ll = 180, 180, 65
s_v;    // Максимальне вертикальне значення
word sv = 45;
word sLH, sLL = 80, 15
word left, right = 0, 1;    // Нижній лівий елемент, Нижній правий елемент
word left_element = 2;    // Лівий верхній елемент
word right_element = 3;    // Правий верхній елемент
void setup()
{
Serial.begin (9600);
h.attach (10);
vattach (9);
h.write (180);
v.write(45);
```

```
delay (3000);
}
void loop ()
{
word left = analogRead(left);    // Лівий верхній елемент
word right = analogRead(right);    // Правий верхній елемент
word left_element = analogRead(left_element);    // Нижній лівий елемент
word right_element = analogRead(right_element);    // Нижній правий елемент
word time = analogRead(4)/20;    // Зчитування інформації
word tol = analogRead(5)/4;
word time = 10;
word total = 50;
word av_left = (left + right) / 2;    // Середнє верхнє значення
word av_right = (left_element + right_element) / 2;    // Середнє нижнє значення
word av_left_element = (left + left_element) / 2;    // Середнє ліве значення
word avr_right_element= (right + right_element) / 2;   // Середнє праве значення
word dvert = av_top – av_down;       // Перевірка різниці між верхньою і нижньою точкою
word dhoriz = av_left – av_right;     // Перевірка різниці між лівою і правою точкою
if (-1 * total > avr_right_element OR avr_right_element > total) // check if the diffirence is in the tolerance else change vertical angle
{
if (av_left > av_right)
{
s = ++s;
if (s > sLH)
{
 s = sLH;
}
```

```
}
else if (av_left < av_right)
{
s = --s;
if (s < sLL)
{
s = sLL;
}}
vertical.write(s);
}
if (-1 * tol > d_h || d_z > tol) // check if the diffirence is in the tolerance else change horizontal angle
{
if (av_left > av_right)
{
s = --s;
 if (s < h_d_ll)
{
s = h_d_ll;
}
}
else if (av_left < av_right)
{
s = ++s;
if (ss > sLH)
{
s = sLH
}
}
else if (av_left = av_right)
```

```
{}
h.write(s);
}
delay(time);
}
```

4.4. Методика захисту програмного забезпечення на основі техніки обфускації

Техніка обфускації під назвою StiK була розроблена на основі нової послідовності перетворень обфускації для вирішення задачі захисту розробленого програмного забезпечення, а також розробленої інформаційної технології.

Вхідними даними для цієї техніки є:

• вихідний код A;

Трансформація структури коду обфускації $S = (S_1,...,S_6)$, S_i є однією з трансформацій: реструктуризація масивів; метод клонування; модифікація умов циклу; метод мертвого коду; використання позначки «перейти до»; метод паралельного коду, $i = \overline{1,6}$;

Обфускаційне перетворення змінних $V = (V_1,...,V_4)$, V_j є одним із перетворень: модифікація відносин успадкування, розбиття або об'єднання змінних, величезних змінних, перетворення статичних даних у процедуру, $j = \overline{1,4}$;

Обфускаційне пунктуаційне перетворення: $P = (P_1, P_2)$, P_k є одним із перетворень: інверсія елементів коду, видалення маркера $k = \overline{1,2}$.

У цій техніці було визначено послідовність обфускації, яку необхідно виконати, щоб забезпечити ефективний захист програмного забезпечення від зворотного інжинірингу, ускладнити процес аналізу та розуміння алгоритму програмного коду.

Алгоритм обфускації коду наступний.

1. Спочатку вихідний код завантажується у фрагмент пам'яті. Цей код розділений на логічні структури $A=\left(A_1,...,A_n\right)$, ($A_x$ - логічна структура коду A, $n\in \mathrm{N}$, $x=\overline{1,n}$). Обсяг логічних структур визначається розміром програмного коду. Потім логічні одиниці A_x, $x=\overline{1,n}$ трансформуються за допомогою деяких перетворень структури затуманення S_i, $i=\overline{1,6}$. Кількість перетворень для кожної логічної структури визначається випадково. Кількість перетворень обфускації для кожного A_x має бути щонайменше три. Заключна частина – об'єднати всі елементи в код і перевірити його доступність.

2. Далі отриманий код розділяється на логічні структури $B=\left(B_1,...,B_m\right)$ (B_y - логічна структура коду B, $m\in \mathrm{N}$, $y=\overline{1,m}$). Логічні структури B_y, $y=\overline{1,m}$ обробляються перетворенням змінної обфускації V_j, $j=\overline{1,4}$ (кількість перетворень обфускації для кожного B_y має бути принаймні два). Отримані трансформовані структури об'єднуються в програмний код C і перевіряється його доступність.

3. Отриманий код ділиться на логічні структури $C=\left(C_1,...,C_g\right)$ (C_z - логічна структура коду C, $g\in \mathrm{N}$, $z=\overline{1,g}$). Далі логічні структури C_z, $z=\overline{1,g}$ трансформуються за допомогою обфускаційних пунктуаційних перетворень P_k, $k=\overline{1,2}$. В результаті цих етапів програмний код D створено та перевірено його доступність.

Для забезпечення більш надійного програмного механізму захисту було запропоновано використовувати більше позначок «goto» після кожного етапу затухання методу StiK. Це перетворення збільшує індекс стабільності програмного коду та середній індекс різниці між кодом перетворення та вихідним кодом. Для його реалізації було використано порушення логіки програми та розробку нечитабельного заплутаного коду. Вихідний програмний код повністю модифікований, проте програма зберігає цілу функціональність вихідного коду.

Для методу захисту StiK був розроблений псевдокод. Основні процедури за схемою представлені на рис. 4.8.

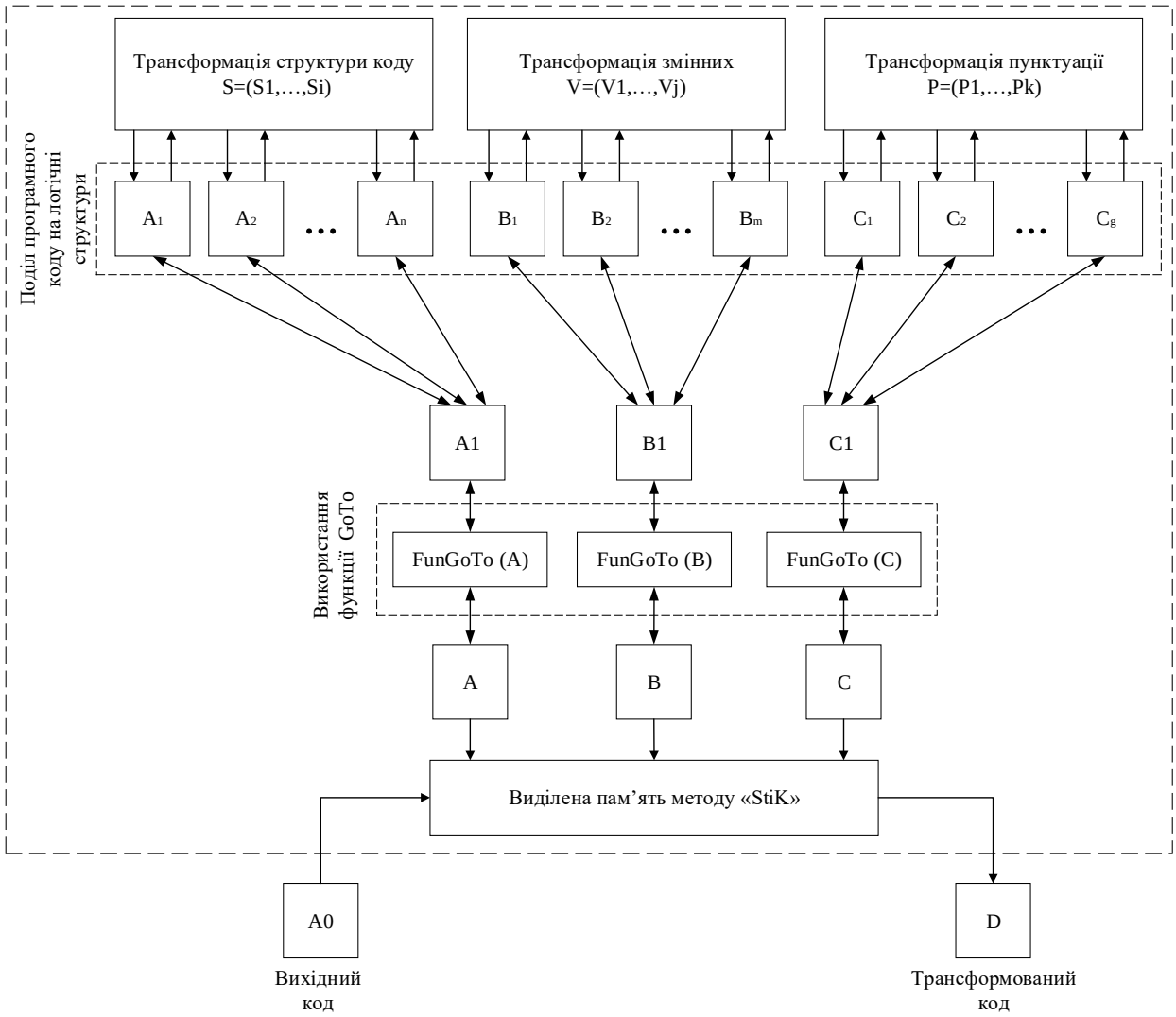


Рис.4.8. Схема роботи обфускаційного методу захисту програмного забезпечення

В методі (рис. 4.8) використовується процедура *OpenFile()* завантаження програмного коду. До вхідного файлу застосовується ім'я файлу, яке буде перетворено.

Функція *FunRand()* застосовується для генерації псевдовипадкової послідовності, завдяки якій були отримані відповідні індекси, які будуть використовуватися для перетворення коду.

Процедура *DivFunction()* використовується для розділення програмного коду на логічні структуру.

CodeStructure (), *VariableFun ()*, *PunctuationFun()* процедури застосовуються для кожного етапу перетворення обфускації. У відповідні процедури були введені дані про логічні структури та сформовані індекси перетворення обфускації.

А *FunGoTo ()*- безумовна інструкція гілки, яка застосовується кілька разів у кожному перетворенні.

Процедура *AssociationF ()* використовується для об'єднання окремих логічних структур в єдиний код.

Застосовується також процедура *Cheking ()* перевірки обґрунтованості сформованого коду.

Процедура *WriteFile ()* зберігає перетворений код як новий файл.

Введення: *NameFile* це ім'я файлу з вихідним кодом, перетвореннями S, P, V

Вихідні дані: *NameFileNew* це ім'я файлу з кодом перетворення.

Програмний засіб розроблено на основі поданої послідовності операцій та створено псевдокод для методу захисту. Програмний засіб StiK було створено з використанням мови програмування С ++ у середовищі програмування Visual Studio 2013. Трансформації заплутаності були визначені з кожної категорії: метод мертвого коду, використання позначки «goto», величезні змінні, видалення токена.

Псевдокод наведно нижче:

1. $A = OpenFile(NameFile);$
2. $\{A_x\} = DivFunction(A)$, $A = (A_1, ..., A_n)$, A_x - це логічна структура A, $n \in N$, $x = \overline{1,n}$;
3. $for(x = 1; x \le n; x++)$
   - 3.1. $\{A_x\} = FunGoTo(\{A_x\})$
   - 3.2. $for(x_1 = 1; x_1 \le 3; x_1++)$
     - 3.2.1. $\{i\} = FunRand(S)$;
     - 3.2.2. $A_x = CodeStructure(A_x, S, i)$, $i \in \overline{1,6}$;
   - 3.3. $\{A_x\} = FunGoTo(\{A_x\})$
   - 3.4. $B = AssociationF(\{A_x\})$;

4. $\{B_y\} = DivFunction(B)$, $B = (B_1, ..., B_m)$, B_y - це логічна структура B, $m \in N$ $y = \overline{1,m}$;

5. $for(y = 1; y \le m; y++)$

5.1. $\{B_y\} = FunGoTo(\{B_y\})$

5.2. $for(y_1 = 1; y_1 \le 2; y_1++)$

5.2.1. $\{j\} = FunRand(V)$;

5.2.2. $B_y = VariableFun(B_y, V, j)$, $j \in \overline{1,4}$;

5.3. $\{B_y\} = FunGoTo(\{B_y\})$

5.4. $C = AssociationF(\{B_y\})$;

6. $\{C_z\} = DivFunction(C)$, $C = (C_1, ..., C_g)$, C_g - це логічна структура C, $g \in N$ $y = \overline{1,g}$;

7. $for(z = 1; z \le g; z++)$

7.1. $\{C_g\} = FunGoTo(\{C_g\})$

7.2. $for(z_1 = 1; z_1 \le 1; z_1++)$

7.2.1. $C_z = PunctionFun(C_z, P, z)$;

7.3. $\{C_g\} = FunGoTo(\{C_g\})$

7.4. $D = AssociationF(\{C_z\})$;

8. $Cheking(D)$

9. $WriteFile(D, NameFileNew)$

Експериментальне дослідження було проведено для визначення швидкісних характеристик процесу затухання та стійкості програмного коду до зворотного інженерного процесу. Розроблено експериментальну методологію з двох частин. Вхідними даними для цих експериментів було 10 файлів із вихідним кодом, вони були перетворені за допомогою розробленого програмного засобу.

В таблицях 4.1 та 4.2 приведені результати тестування розробленого програмного забезпечення.

Таблиця 4.1

Результати оцінки рівня обфускації

File	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Середняшвидкість
Розмір файла, КБ	4.09	0.90	5.18	2.68	3.08	1.34	1.51	1.18	0.72	3.55	
t, с Smart Assembly	0.1	0.008	0.14	0.012	0.029	0.042	0.028	0.016	0.038	0.027	
t, s StiK	0.103	0.038	0.12	0.058	0.061	0.033	0041	0.022	0.017	0.058	
Розмір файла, КБ Smart Assembly	4.95	1.86	10.0	3.08	3.42	3.86	3.01	3.56	1.31	3.68	
Розмір файла, КБ StiK	8.23	3.75	14.7	6.97	5.86	4.71	4.96	5.27	3.95	5.33	
Швидкість, КБ/с Smart Assembly	49.5	202.5	75.5	256.6	118.9	91.7	107.3	205.6	34.1	136.3	**127.8**
Швидкість, КБ/с StiK	82.9	99.7	132.6	138.1	96.1	162.7	125.9	239.5	232.4	95.9	**140.6**

Таблиця 4.2

Оцінка рівня захищеності коду від реверсної інженерії

Категорії	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Середнє відношення
Кількість процесів у вхідному коді	14	4	39	22	16	17	31	8	5	28	**18.4**
Кількість процесів у StiK	55	19	383	58	38	123	157	81	49	106	**106.9**
Кількість процесів у Smart Assembly	47	26	187	39	67	84	85	46	32	79	**69.2**
Коефіцієнт для STiK	3.93	4.75	9.82	2.64	2.38	724	5.06	1013	9.80	3.79	**5.95**
Коефіцієнт для Smart Assembly	3.36	6.50	4.79	1.77	4.19	4.94	2.74	5.75	6.40	2.82	**4.33**

Таким чином, в результаті аналізу даних (табл. 4.1 та 4.2), було виявлено, що середній індекс різниці між кодом трансформації та вихідним кодом становив 36,21%, а середні характеристики швидкості для методу обфускації становили 140,6 КБ на секунду. Згідно з експериментальними результатами обфускатор StiK на 10% швидший, а також в 1,37 рази більше захищений, ніж аналоги. Це допомагає підприємствам галузі телекомунікацій забезпечити захист даних від різних типів атак.

Висновки до розділу 4

Цей розділ присвячено розробці інформаційної технології підвищення ефективності підсистем базових станцій операторів стільникового зв’язку.

Отже, вперше було розроблено інформаційну технологію підвищення ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, яка на відміну від відомих, за рахунок використання удосконаленого методу планування підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій та методу підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку дозволяє зменшити енергетичні витрати, витрати на побудову та експлуатацію підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, а отже підвищити технічну, енергетичну та економічну ефективність підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку.

Було продемонстровано, що виділяються два основних, хоча і тісно пов'язаних між собою, напрямки: зниження енергоспоживання базової станції і використання альтернативних джерел електроенергії. У міру зниження енергоспоживання базової станції, застосування альтернативних джерел енергії стає все більш виправданим, проте в цілому ніша їх застосування залишається сильно обмежена.

Основний результат застосування розробленої інформаційної технології полягає в отриманні оптимальної архітектури підсистем БС та саме підвищенні ефективності підсистеми БС.

Також в даному розділі на основі використання розроблених методів, моделей та інформаційної технології було реалізовано програмне забезпечення для планування більш ефектиної підсистеми базових станцій опреатора стільникового зв’язку.

Крім того, було розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення для для адаптивного підлаштування розміщення сонячних панелей для підвищення енергетичної ефективності базових станцій. Для цього було розроблено прилад та програмне забезпечення на базі Arduino. Це дозволило підвищити енергетичну ефективність базових станцій та підвищити коефіцієнт використання альтернативних джерел енергії.

Для гарантування захищеності даного програмного продукту було

удосконалено методику захисту програмного забезпечення мобільного оператора на основі техніки обфускації.

Згідно з експериментальними результатами розроблений обфускатор StiK на 10% швидший, а також в 1,37 рази більше захищений, ніж аналоги. Це допомагає підприємствам галузі телекомунікацій забезпечити захист даних від різних типів атак.

Список використаних джерел

1. Емельянов А.К. Пути повышения энергоэффективности подсистем базовых станций сетей сотовой связи./ Интернет-журнал «Науковеденение» – 2013 – №4 – С.1-12.

2. Lubritto C. Telecommunication power system: energy saving, renewable sources and environmental monitoring//Trends in Telecommunications Technologies. – InTech,2010. – P.145-164.

3. Lorincz J., Garma T., Petrovic G. Measurements and modeling of base station power consumption under real traffic loads//Sensors. – 2012. –№12. – P.4281-4310.

4. Фотоэлектрические элементы и модули: история, принцип действия, технологии, применение [електронний ресурс] – електронні текстові дані – режим доступу: https://magus.com.ua/a144153-fotoelektricheskie-elementy-moduli.html

5. Енергозбереження і енергоефективність-1. Конспект лекцій для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи». - К.: НТУУ “КПІ”, 2014. – 106 с.

6. Панченко А.В. Биотопливо альтернативный источник энергии// энергобезопасность в документах и фактах. – 2007– №6(18) – С.14-18.

7. Oleh Polihenko, Roman Odarchenko, Sergiy Gnatyuk, “Enterprise information security management system based on the modern obfuscation technique for mobile network operators”, European Ciiperation, Vol.3 No.47 (2020). https://european-cooperation.eu/index.php/EC/article/view/88

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, складає вирішення науково-технічної задачі, яка полягала в необхідності підвищення ефективності підсистеми базових станцій стільникових мереж зв’язку. У дисертаційній роботі отримані такі теоретичні та практичні результати.

1. За аналізом якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж LTE в світі та стільникових мереж 3G 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 підсистем базових станцій. При цьому було визнаено ряд проблем функціонування п

2. Удосконалено метод планування підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку за рахунок урахування впливу додаткових параметрів на процес розповсюдження радіохвиль, побудови функціонально-стійкої топології зв'язку між базовими станціями та порівняння варіантів побудови по вартості. Даний метод надав змогу більш точно визначати радіус зон обслуговування базових станцій (до 9-10%) та обирати найбільш оптимальний варіант по критерію вартості та функціональної стійкості (до 99%).

3. Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій за рахунок використання багатоканальної передачі даних, додаткового радіоінтерфейсу не-3GPP стандарту, протоколів MPQUIC, MPTCP та MLPPP та динамічного зваженого балансування навантаження.

Даний метод надає змогу відвіі збільшити кількість активних абонентів в мережі та на 15 % зменшити сукупне енергоспоживання.

4. Вперше розроблено метод підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, який на відміну від відомих, полягає в послідовному використанні процедур розвантаження радіоінтерфейсу базових, альтернативних джерел відновлюваної енергії,

адаптивного енергоспоживання, що дозволяє зменшити витрати енергії, адаптувати випромінювану потужність до потреб абонентів та підвищити економічну ефективність підсистеми базових станцій.

5. Вперше розроблено інформаційну технологію підвищення ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, яка на відміну від відомих, за рахунок використання удосконаленого методу планування підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій та методу підвищення енергетичної ефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку дозволяє зменшити енергетичні витрати, витрати на побудову та експлуатацію підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку, а отже підвищити технічну, енергетичну та економічну ефективність підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку.

6. Розроблено відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення для планування більш ефективної архітектури підсистеми базових станцій та підвищення її ефективності. Для гарантування захищеності даного програмного продукту було удосконалено методику захисту програмного забезпечення мобільного оператора на основі техніки обфускації.

Вищенаведені наукові **результати** дають можливість вирішити задачу підвищення ефективності підсистеми базових станцій операторів стільникового зв’язку.

ДОДАТКИ

П О Г О Д Ж У Ю

Проректор Національного авіаційного університету з навчальної роботи

_____ А.Г. Гудманян

«____» _____ 2020 р.

З А Т В Е Р Д Ж У Ю

Проректор Національного авіаційного університету з наукової роботи

_____ В.П. Харченко

«____» _____ 2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук Полігенька Олега Олеговича у навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, *завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, д.т.н., проф. Г.Ф. Конахович, декан Факультету 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 кандидата технічних наук Полігенька Олега Олеговича*

використовуються у навчальному процесі *на кафедрі телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.*

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Модель оцінки енергоефективності підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку	*У навчальний процес як методичні рекомендації для проведення лабораторних занять з дисциплін «Мережі мобільного радіозв'язку». Завдяки своїй наочності впроваджені методичні рекомендації підвищили ефективність засвоєння студентами матеріалу зазначеної дисципліни.*
Програмне забезпечення для проектування ефективної підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку	*У навчальний процес як методичні матеріали для проведення курсового проектування з дисципліни «Мережі мобільного радіозв'язку». Впроваджений метод дозволив підвищити якість підготовки студентів, що навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», освітньою програмою «Телекомунікаційні системи та мережі» шляхом набуття ними знань про методи побудови ефективних підсистем базових станцій операторів стільникового зв'язку.*

Завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектроннихсистем, д.т.н., проф. _____ Г.Ф. Конахович

Декан Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій д.т.н., проф. _____ І.О. Мачалін

vodafone

14.08.2020

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Полігенько Олега Олеговича «Інформаційна технологія для підвищення ефективності підсистеми базових станцій стільникового оператора» на здобуття кандидата технічних наук у діяльність ПрАТ «ВФ Україна»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Полігенько Олега Олеговича «Інформаційна технологія для підвищення ефективності підсистеми базових станцій стільникового оператора» впроваджено та використано у діяльності ПрАТ «ВФ Україна».

Під час написання дисертації Полігенько О.О. розробив відповідне алгоритмічне і програмне забезпечення для адаптивного підлаштування розміщення сонячних панелей для підвищення енергетичної ефективності базових станцій, (прилад та програмне забезпечення було реалізоване на базі Arduino).

Програмний засіб призначений для підвищення енергетичної ефективності базових станцій. Основною особливістю є те, що сонячна панель змонтована на спеціальну рухому платформу, на якій знаходяться фотоелементи, що вимірюють ефективність попадання сонячних променів та підлаштовують сонячну панель таким чином, щоб та збирала достатню кількість світла.

У діяльності нашої компанії дане програмне забезпечення використано для оцінки зменшення витрат на утримання БС.

Отже, результати отримані Полігенько О.О. під час написання дисертаційної роботи, дозволили спрогнозувати зменшення витрат, грошових ресурсів, що в свою чергу дає змогу підвищити ефективність підсистеми базових станцій стільникового оператора.

Начальник відділу
планування та розвитку
мережі радіодоступу К.А. Науменко

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «ВФ УКРАЇНА»

Додаток В

Статті у наукових виданнях, включенних до переліку наукових фахових видань України

1. Одарченко Р.С., Полігенько О.О., Дика Н.В., Поліщук В.В. Дослідження основних недоліків базових станцій різних поколінь стільникового зв'язку // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. –№3. – С.81-89.

2. Хассан Мохамед Мухи-Алдин. Модель оцінки підвищення енергоефективності підсистем базових станцій оператора стільникового зв'язку. Одарченко Р.С., Мухі- Алдін Хассан Мохамед, О.О. Полігенько, Ю. І. Хлапонін. Вісник інженерної академії, 2019. № 3. С. 72-74.

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Європейського союзу

3. Oleh Polihenko, Roman Odarchenko, Sergiy Gnatyuk, "Enterprise information security management system based on the modern obfuscation technique for mobile network operators", European Ciiperation, Vol.3 No.47 (2020). https://european-cooperation.eu/index.php/EC/article/view/88

4. Arturo Arakelian, Oleh Polihenko "Improvement of Implementation of Merkle Crypto System", Scientific and practical security journal (SPCSJ), pp.40-44, https://journal.scsa.ge/wp-content/uploads/2019/10/6-331.pdf

Матеріали й тези конференцій

5. Полігенько О.О., Одарченко Р.С., Потапов В.Г. Аналіз алгоритмів множинного доступу до каналів супутникового зв'язку // Проблеми інформатизації та управління.– К.: НАУ, 2013.– Вип.1 (41).– С.75-80.

6. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Полігенько О.О. Експериментальні дослідження пропускної здатності мереж стандарту IEEE 802.11n //Наукоємні технології. – 2013. – № 4 (20). – С.377-383.

7. О.О. Полигенько, Р.С. Одарченко, Н.В. Дикая, О.Ю. Скульская Исследование причин возникновения аварийных ситуаций операторов сотовой связи в Украине // Современные средства связи: международная научно-

техническая конференция, 18-19 октября 2018 г.: тезы доп. – МинскБ Республика Беларусь., 2018. – С. 23 – 24.

8. Traffic offload improved method for 4G/5G mobile network operator / R. Odarchenko, A. Abakumova, O. Polihenko, S. Gnatyuk. Proceedings of the 35 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 – Proceedings 2018-April, P. 1051-1054. (Scopus)

9. 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)

10. Roman Odarchenko, Nadiia Dyka, Oleh Poligenko, Liudmila Kharlai, Anastasiia Abakumova. Mobile operators base station subsystem optimization method // Science and Technology (PIC S&T) 2017:4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, 10-13 October 2017: abstracts.– Kharkiv, 2017. – P. 29-33.

11. Полігенько О.О. Методи оптимізаціїї потоків трафіку в мережах LTE// Політ. Сучасні проблеми науки: XV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 8-9 квітня 2015 р.: тези доп. – К., 2015. –С.10.

12. Одарченко Р.С., Полігенько О.О. Порівняльний аналіз технологій 3-го та 4-го поколінь // Політ-2011. Сучасні проблеми науки XV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 7–9 квітня 2010 р.: тези доп. – К., 2011. – С. 31.

13. Одарченко Р.С., Полігенько О.О. Варіанти оптимізації підсистеми базових станцій // Автоматика та комп’ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція, 16–17 листопада 2017р.: тези доп. – Кропивницький, 2017. – С.176.

14. Дика Н.В., Одарченко Р.С., Полігенько О.О., Слободян О.П. Проблеми ефективності та захищеності підсистеми базових станцій мережі LTE // IV всеукраїнська науково-практична конференція «Перпективні напрями захисту інформації», 02-06 вересня 2018 р.: тези доп. – Одеса., 2018. – С. 33 –34.