

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-6>

ТЕЛЕКЕРУВАННЯ ВІДДАЛЕНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА ОСНОВІ GSM-ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ СЛАБКОГО СИГНАЛУ ВІД БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

Матвієнко Вадим Анатолійович,

студент групи 174-24-дф

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0007-0857-0891

У статті розглянуто проблему організації телекерування на віддалених електричних підстанціях без постійного обслуговуючого персоналу. Недостатня кількість обслуговуючого персоналу на електроенергетичних об'єктах, яка спостерігається останнім часом, дуже ускладнює їх експлуатацію. Рішенням цієї проблеми розглядається впровадження системи телекерування і моніторингу обладнання на основі промислового Ethernet, але на деяких віддалених об'єктах виникають складнощі з впровадженням таких систем у зв'язку з особливостями їх розташування та рельєфу місцевості. Для вирішення цієї проблеми розглянемо використання безпроводних технологій, а саме використання радіоканалу і різноманітні методи використання GSM-зв'язку, щоб організувати телекерування на прикладі однієї підстанції, яка розташована далеко від диспетчерського пункту на околицях міста. Безпроводні технології мають як позитивні риси, так і недоліки, особливо якщо об'єкти розташовані в зонах слабого сигналу або наявності великої кількості перешкод. У статті розглянуто обґрунтування вибору оптимальної технології передачі команди керування в умовах послабленого сигналу, а також проведено вимірювання рівня та якості сигналу для використання LTE- або DTMF-технологій в організації телекерування віддаленою електричною підстанцією. Проведено обґрунтування вибору принципу передачі команди керування за допомогою технології DTMF (Dual Tone Multi-Frequency). Розглянуто створення системи керування на основі DTMF-технології, а також захист від хибних дій під час використання мобільного телефону в разі виходу з ладу пульта керування, забезпечення захисту від несанкційного втручання в роботу пристрою. Розглянуто метод формування команд в умовах можливого зниження рівня та якості сигналу.

Ключові слова: системи телекерування, DTMF-технологія, керування електричними підстанціями.

Matviienko Vadym. Remote control of remote power grid facilities based on GSM communication, in conditions of a weak signal from a base station

The article considers the problem of organizing remote control at remote electrical substations without permanent maintenance personnel. The insufficient number of maintenance personnel at power facilities, which has been observed recently, greatly complicates their operation. The solution to this problem is considered to be the implementation of a remote control and equipment monitoring system based on industrial Ethernet, but at some remote facilities there are difficulties with the implementation of such systems due to the peculiarities of their location and terrain. To solve this problem, we will consider the use of wireless technologies, namely the use of a radio channel and various methods of using GSM communication to organize remote control using the example of one substation, which is far from the dispatching station on the outskirts of the city. Wireless technologies have both positive features and disadvantages, especially if the facilities are located in areas with a weak signal or a large number of obstacles. The article considers the justification for choosing the optimal technology for transmitting control commands in conditions of a weakened signal, and also measures the level and quality of the signal for using LTE or DTMF technology in organizing remote control of a remote electrical substation. The justification for choosing the principle of transmitting control commands using DTMF (Dual Tone Multi-Frequency) technology is provided. The creation of a control system based on DTMF technology is considered, as well as protection against erroneous actions when using a mobile phone in the event of a failure of the control panel. Ensuring protection against unauthorized interference in the operation of the device. The method of forming commands in conditions of a possible decrease in the level and quality of the signal is considered.

Key words: remote control systems, DTMF technology, control of electrical substations.

Вступ. Керування віддаленими об'єктами електропостачання без чергового персоналу викликає низку труднощів у зв'язку з тим, що неможливо вчасно провести оперативні перемикання або відреагувати на аварійні відключення, викликані необхідністю доставки оперативних робітників. Наразі склад оперативно-диспетчерської служби скоротився майже вдвічі порівняно

з 2020 роком і навантаження на персонал зростає. Впровадження повноцінної системи керування (Emerge Management System) може допомогти вирішити це питання, але є підстанції, на яких їх розташування може викликати труднощі із зв'язком. Розглянемо ситуацію на діючому металургійному підприємстві, де диспетчер перебуває в центрі промислового майданчика,

а підстанція, що забезпечує електроспоживання базового складу вугілля, – за її межами на околицях міста. Використання дротового з'єднання (Ethernet, GPON, ADSL тощо) обмежено рельєфом місцевості та особливістю розташування, тому далі будемо розглядати безпроводні технології. Згідно з посібником [1], мінімальне значення часу передавання інформації має бути таким: для регулювання частоти і потужності – не більше 1 с; для керування вимикачами – кілька секунд; для релейного захисту – не більше 0,04 с. З безпроводних технологій найбільш оптимальним є використання радіоканалу з технологією LoRaWAN [2], але, згідно з дослідженням [3], дальність зв'язку в місті становить від 2 до 5 км, а в сільській місцевості – 15 км. Відстань між диспетчерським пультом і підстанцією в цьому випадку становить 7,3 км, до того ж наявність промислових будівель і споруд не дають змоги використовувати цю технологію. Керування за допомогою GSM-зв'язку надає такі переваги: широкий радіус дії, двосторонній зв'язок. Існує декілька способів реалізації взаємодії: вмикання за викликом, через відправку SMS-повідомлень, DTMF-сигналами, GPRS-, CSD- та LTE-мережі. Керування за викликом підходить лише для поодиноких пристроїв, має тільки одну перевагу: воно безкоштовне, але побудова пристрою для виконання кількох команд не має сенсу. Керування за допомогою SMS, розглянуті в роботі [4], мають сенс за наявності якісного сигналу, але за зниження рівня сигналу затримка повідомлень може сягати кількох годин, що неприпустимо, коли перемикання стосуються силових трансформаторів. Силові трансформатори тільки короткочасно можна ставити на паралельну роботу, тому що це викликає великі перетоки струму і може спричинити хибне відключення навіть обох трансформаторів, а запізнілий прийом SMS може викликати неконтрольовані дії обладнання. В такому разі SMS можна використовувати тільки для моніторингу вимірювальних параметрів. Такі ж самі недоліки стосуються GPRS (General Packet Radio Service), максимальна продуктивність якого становить 10 кБ/с [5], а затримка може сягати більше 20 с. CSD (Circuit Switched Data) має затримку менше 10 с, але від його використання відмовляються оператори мобільного зв'язку. Отже, для створення системи телекерування розглянемо використання DTMF (Dual Tone Multi-Frequency) технології і LTE (Long-Term Evolution), мобільний інтернет.

DTMF (Dual Tone Multi-Frequency) – це двотональна багаточастотна сигналізація, яка використовує голосовий діапазон частот для зв'язку

з комутаційними центрами, принцип роботи якої розглянуто у джерелах [6; 7; 8]. Позитивною рисою цієї технології є те, що команди виконуються із затримкою не більше 40 мс. Під час натискання клавіші на передаючому пристрої формується дуальний звуковий сигнал, який одразу дешифрується і відтворюється у приймальному пристрої. DTMF використовується у всіх видах мобільного та стаціонарного зв'язку, тому зміна стандартів потребує тільки заміни передаючого модуля. До недоліків можна віднести залежність від якості мобільного зв'язку, неможливість скасування команди (можна тільки не підтвердити, щоб приймальний модуль її ігнорував, бо вона формується в ньому). Підходить для створення дискретних команд керування, а також має складнощі з організацією моніторингу вимірювальних параметрів.

Технологія LTE, переваги якої розглянуто у статті [9], а також LTE-M (LTE for Machine-Type Communications) [10] дає змогу керувати пристроями із затримкою, яка не перевищує 2 мс за умови якісного зв'язку. Використання IP-орієнтованої мережевої архітектури дає можливість інтегрувати велику кількість пристроїв. LTE більш за все підходить для організації системи моніторингу та керування як промисловими, так і енергетичними об'єктами.

Підстанція, на якій потрібно організувати телекерування, розташована на околицях міста, і сигнал від базових станцій стільникового зв'язку слабкий. В цих умовах перевіримо можливість впровадження сталого керування з використанням технологій LTE і DTMF.

Метою статті є перевірка можливості організації телекерування віддаленими підстанціями за допомогою GSM-зв'язку та з використанням технологій LTE і DTMF в умовах слабого сигналу від базових станцій. Також слід провести оцінку часу передачі команди, втрату зв'язку та керуючої команди.

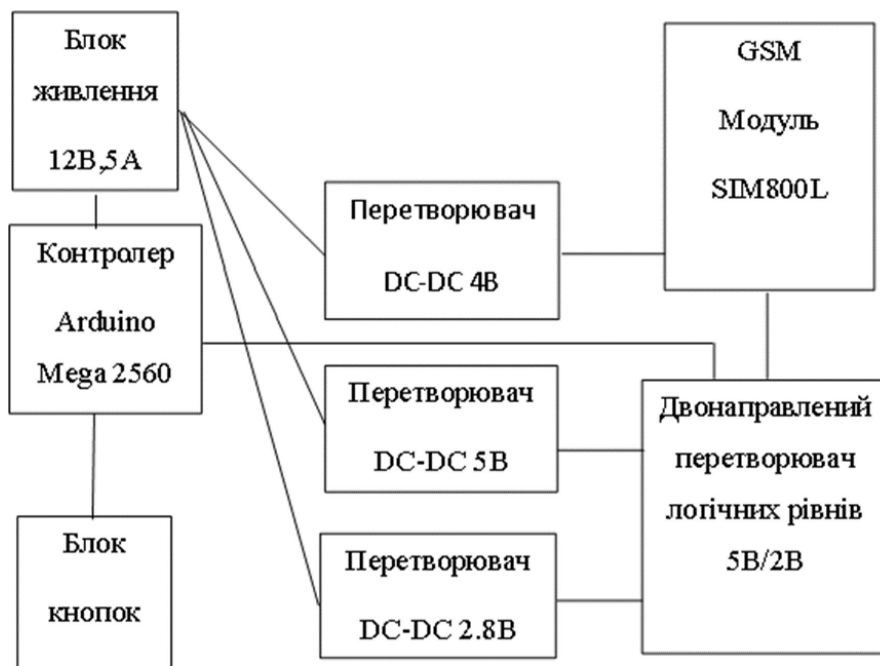
Матеріали та методики дослідження. Перевіримо рівень та якість сигналу від базової станції в стандарті LTE, що належить до четвертого покоління мобільного зв'язку (4G). Для цього використаємо звичайний смартфон Xiaomi 23030RAC7Y зі встановленим застосунком Network Cell Info Lite. Оцінку якості проведемо за такими показниками:

- RSRP (Reference Signal Received Power) – прийнята потужність опорного сигналу, дБм;
- RSRQ (Reference Signal Received Quality) – якість прийому еталонного сигналу, дБ;
- RSSNR (Reference Signal to Signal Noise Ratio) – співвідношення опорного сигналу до шуму, дБ.

Таблиця 1

Показники якості сигналу

Параметр	RSRP	RSRQ	RSSNR
Одиниця вимірювання	дБм	дБ	дБ
Відмінний сигнал	Від –80 і вище (висока, 50 Мбіт/с)	Від –9 і вище (відмінна якість)	Від 20 і вище (максимальна швидкість)
Гарний сигнал	Від –80 до –100 (хороша, 20–50 Мбіт/с)	Від –9 до –12 (гарна якість)	Від 10 до 20 (гарна швидкість)
Задовільний сигнал	Від –100 до –110 (задовільна, 5–20 Мбіт/с)	Від –12 до –15 (задовільна якість)	Від 3 до 10 (задовільна швидкість)
Поганий сигнал	Нижче –110 (низька, <5 Мбіт/с нестабільно)	Нижче –15 (низька якість, часті помилки)	Від 0 до 3 (дуже низька швидкість)


Рис. 1. Передаючий пристрій

Одноетапного стандарту оцінки якості та рівня сигналу немає, кожен виробник мобільних засобів оцінює по-своєму. Оцінку будемо проводити за даними табл. 1 на основі інформації з ресурсів [11; 12]. Виміри параметрів сигналу проводились за умови сухої погоди (рис. 1) та під час дощу (рис. 2).

Для перевірки роботи телекерування на основі DTMF зробимо систему, яка буде являти собою два пристрої, а саме передаючий та приймаючий, на основі GSM-модуля SIM800L. Керування модулем SIM800L, а також всією апаратною частиною пристрою здійснюється контролером Arduino Mega2560 R3 (CH340). Контролер Arduino Mega2560 і GSM модуль SIM800L мають різний рівень логічної напруги, 5В і 2,8 В відповідно. Для їх з'єднання (Rx,Tx) використовуємо двоканальний двонаправлений перетворювач логічних рівнів. Необхідно забезпечити три рівні напруги для живлення модулів пристрою: 5 В, 4 В, 2,8 В. До основного блоку

живлення під'єднаємо три DC-DC понижуючих конвертора MP1584 3А, з діапазоном регулювання напруги 2,5–20 В. Контролер Arduino Mega2560 через вхід Vin під'єднаємо безпосередньо до блоку живлення. Формування команд відбувається натисканням тактової кнопки. Оскільки команди виконуються по одній і короткочасно, для коректної роботи кнопок використовуємо внутрішній підтягуючий резистор в процесорі до +5 В (INPUT PUL_UP). В такому разі немає ризику перегріти процесор. Блок-схеми передаючого і приймального пристроїв зображено на рис. 1 та рис. 2. В цьому проєкті не було потреби у зворотному зв'язку, але це легко організувати, тому що блоки працюють в обох напрямках однаково. Модуль SIM800L може як генерувати, так і дешифрувати DTMF-сигнали, тому використання окремого дешифратора, такого як, наприклад, MT8870 [8], не потрібно. У статті [7] зазначено, що режим DTMF активується через 30 с після виклику, але практично

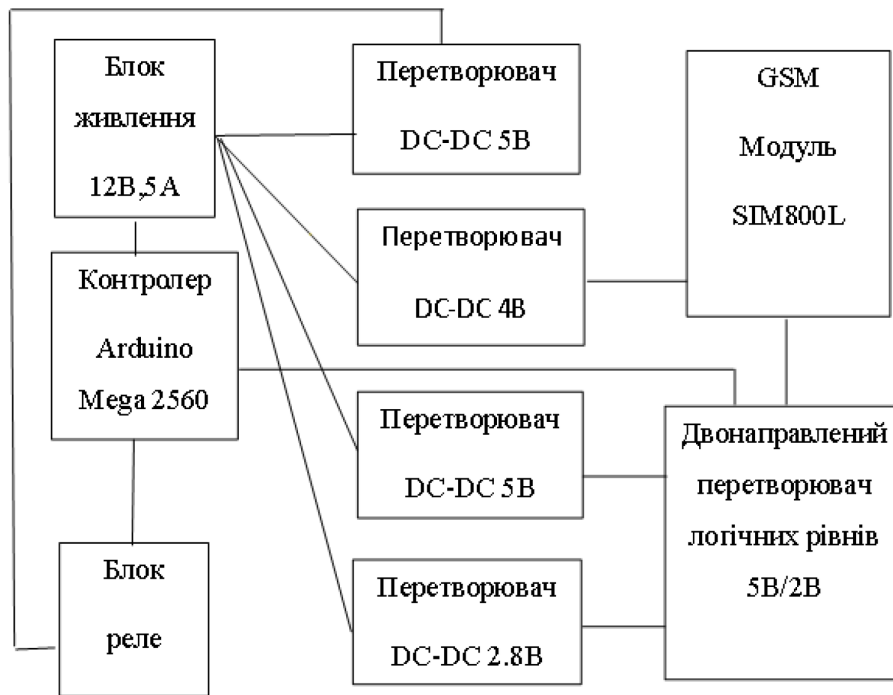


Рис. 2. Приймальний пристрій

доведено, що цей режим готовий до роботи після встановлення з'єднання, якщо він активований в установчій частині програми Void Setup. Програмне забезпечення для обох пристроїв розроблено в середовищі Arduino IDE. Вмикання детектування відбувається надсиланням у модуль команди AT+DDT=1 [13]. Коли модуль розпізнає DTMF-сигнали, він відправляє у Serial port сповіщення «+DTMF:<клавіша>». Парсимо повідомлення і виділяємо символ клавіші, який в подальшому обробляємо. Для підстанції, на якій проводимо дослід, потрібно 36 команд, тому вони будуть складатися з комбінації з трьох

клавіш. У разі виходу з ладу пульта керування можливе зі звичайного мобільного телефону. Диспетчер має список команд, які складаються з комбінації трьох цифр клавіатури телефона.

Особливістю сигналів DTMF є те, що під час натискання кнопки на клавіатурі телефона сигнал одразу з'являється в приймальному пристрої і команда формується в ньому, тому скасувати її неможливо. Щоб уникнути помилкових дій диспетчера, в кінці кожної команди додано символ «#» для підтвердження цифр на екрані телефона. Також у програмі робимо захист від відскоку контактів, щоб не відбулося подвійне

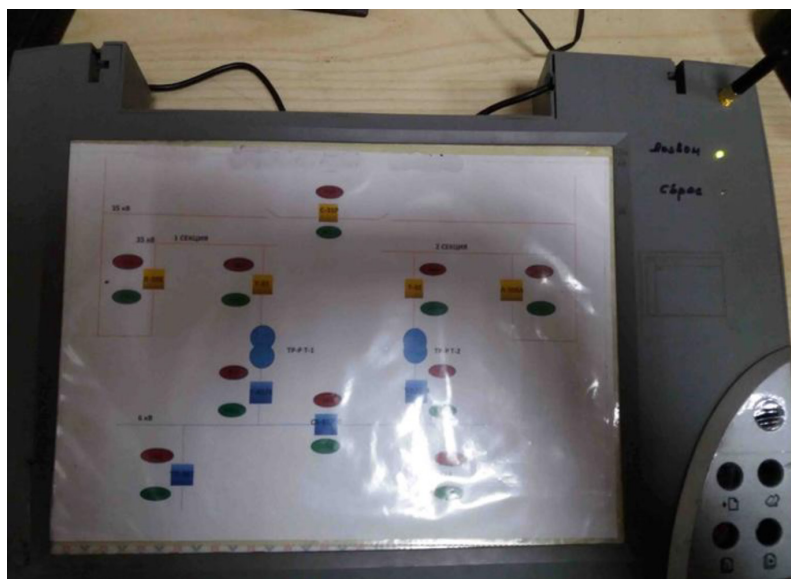


Рис. 3. Загальний вигляд передаючого пристрою (пульту)

натискання. Використання технології DTMF дасть змогу організувати швидку передачу команди від диспетчера до підстанції, оскільки час формування команди становить 40 мс, пауза між ними – 25 мс [6]. Таким чином, загальний час виконання команди становить: $4 \cdot 40 \text{ мс} + 3 \cdot 25 = 235 \text{ мс}$, що є прийнятним для ведення оперативних перемикачів. Окрім керування, в ньому передбачено захист від несанкціонованого втручання, приймальний пристрій реагує лише на декілька прописаних у програмі номерів. Зовнішній вигляд передаючого і приймального блоків зображено на рис. 5 та рис. 6. Під'єднання до оперативних кіл одного з приєднань підстанції паралельно ключам керування зображено на рис. 7.

Як було зазначено вище, основним недоліком систем керування з використанням сигналів DTMF і мобільного зв'язку загалом є якість зв'язку. Для перевірки якості роботи за слабких

сигналів використовуємо приймальний блок, під'єднаний до комп'ютера зі встановленою Arduino IDE і програмою для приймального модуля. В стандарті 2G немає опорного сигналу RSRP і показника якості еталонного сигналу RSRQ, тому оцінку будемо проводити за рівнем сигналу від базової станції RSSI (Received Signal Strength Indicator). Відкриваємо монітор порта і відправляємо команду:

AT + CSQ [13].

Отримуємо:

+CSQ:A,B,

де А змінюється від 0 до 31 (чим вище, тим краще якість сигналу),

В – частота помилок.

Знаходимо рівень сигналу, який надходить від базової станції RSSI (Received Signal Strength Indicator) за формулою:



Рис. 4. Загальний вигляд приймального пристрою

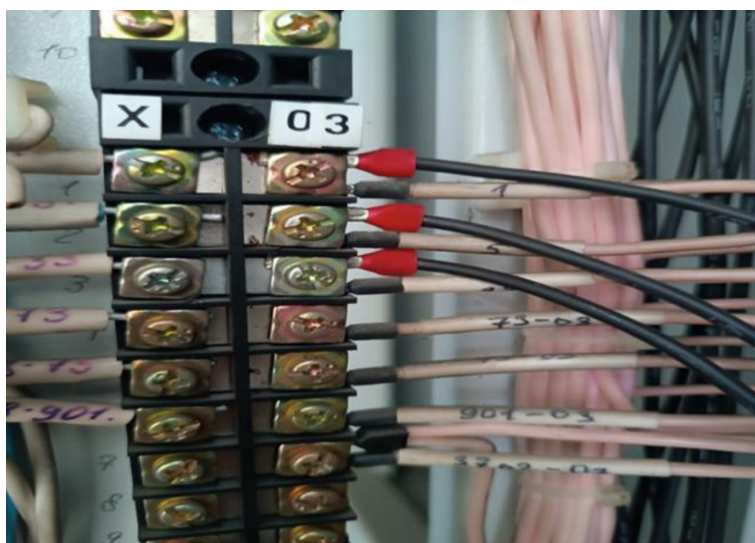


Рис. 5. Під'єднання до оперативних кіл керування вимикачем

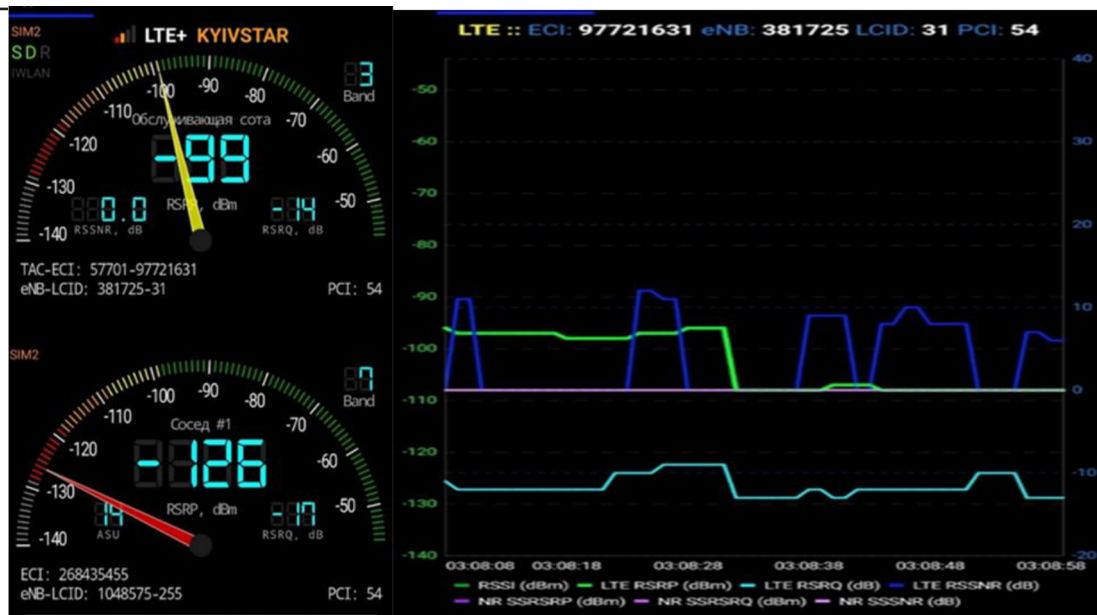


Рис. 6. Виміри ключових показників рівня та якості сигналу LTE за умови сухої погоди

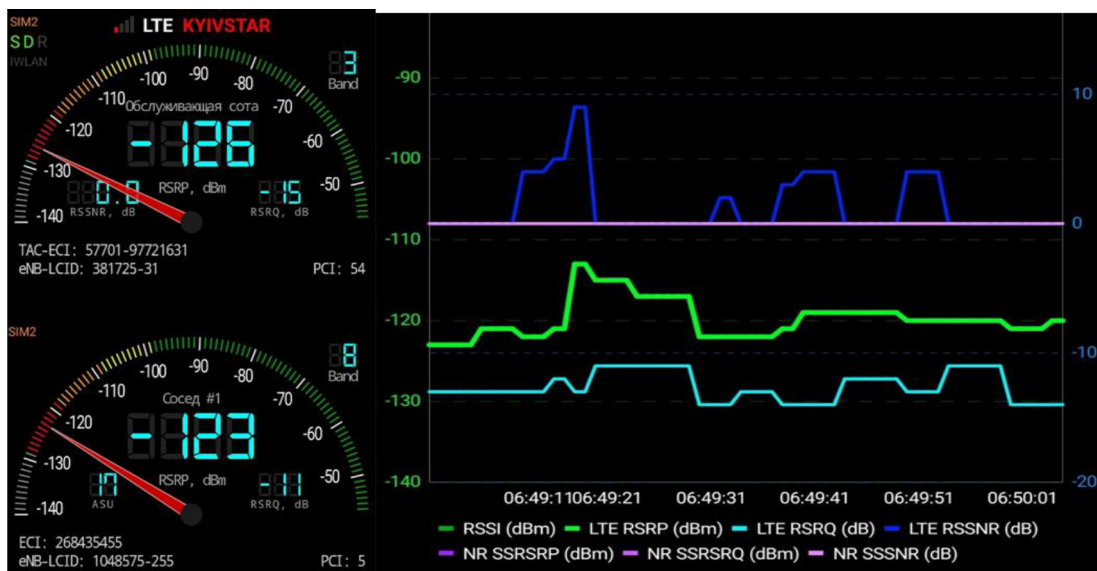


Рис. 7. Виміри ключових показників рівня та якості сигналу LTE під час дощу

$$RSSI = -113 + (A \cdot 2), \text{ дБм.}$$

Силу сигналу будемо оцінювати за даними табл. 2 з ресурсу [14].

Таблиця 2

Значення RSSI для 2G

RSSI (дБм)	Якість сигналу
Більше -70	Дуже якісний сигнал, надійний зв'язок
Від -70 до -85	Хороший сигнал, надійний зв'язок
Від -86 до -100	Задовільний сигнал, можливі короточасні перебої
Від -100 до -110	Дуже слабкий сигнал, можливі часті розриви
Менше -110	Немає зв'язку, пристрій не може зареєструватись у мережі

Результати. Отримали вимірювання для технології LTE. За аналізом графіка вимірювання під час сухої погоди (рис. 6) рівень опорного сигналу RSRP коливається в межах від -96 до -110 дБм, що, згідно з табл. 1, відповідає рівню від хорошого до межі задовільного та поганого сигналу. Якість прийому еталонного сигналу RSRQ перебуває на задовільному рівні. Співвідношення опорного сигналу та шуму RSSNR має різко спадаючу характеристику від 0 до 10 дБ, тобто швидкість передачі різко змінюється від задовільної до поганої. В таких умовах спостерігається повільне з'єднання від 3кБ/с до 30кБ/с, часті розриви або відсутність зв'язку.

Графік вимірювання параметрів сигналу в дощову погоду, представлений на рис. 7, має такі показники. RSRP коливається в межах

від -112 до -124 дБм, що відповідає поганому рівню опорного сигналу. RSRQ перебуває на межі задовільного та поганого рівня. Співвідношення опорного сигналу та шуму RSSNR також має різко спадаючу характеристику від 0 до 8 дБ, тобто швидкість передачі різко змінюється від задовільної до поганої. Як видно з графіка, більшість часу RSSNR має значення 0 , що вказує на багато перешкод і труднощі з використанням мережевих ресурсів. В таких умовах спостерігається повільне з'єднання від 0 кБ/с до 5 кБ/с.

В обох випадках періодично спостерігається (hand over) автоматичний перехід від 4G до 3G та навіть 2G. Тому далі розглянемо можливість організації телекерування з використанням стандарту 2G, а саме використання технології DTMF. Рівень сигналу також залежить від погодних умов. Так, в сонячну погоду спостерігається рівень сигналу від -95 дБм до -84 дБм, відповідно від задовільного до хорошого (табл. 2). У дощову погоду рівень сигналу коливається між -103 дБм і -95 дБм, відповідно від поганого до задовільного (табл. 2). Далі перевіримо роботу голосового каналу, а саме передачу сигналу DTMF.

В процесі випробування отримано такі дані:

- за рівня сигналу -91 дБм і вище спрацюють усі клавіші;
- за рівня сигналу -97 дБм спостерігається нестабільна робота сигналів, умовно позначених нижче жовтої лінії (рис. 8);
- за рівня сигналу -103 дБм – нестабільна робота сигналів, умовно позначених нижче червоної лінії (рис. 8);
- за рівня сигналу -108 дБм і нижче відбувається майже втрата зв'язку, DTMF сигнали не спрацюють.

1	2	3	697 Гц
4	5	6	770 Гц
7	8	9	852 Гц
*	0	#	941 Гц
1 209 Гц	1 336 Гц	1 477 Гц	

Рис. 8. Двотональні сигнали DTMF та їхні частоти

Отже, для підвищення надійності в кодуванні команд доречно використовувати символи, які розташовані вище умовної червоної лінії (рис. 8), а саме «2», «3», «5», «6», «9», «#». Ці клавіші спрацюють до межі втрати зв'язку. На рис. 9 представлено порівняння сигналу від обслуговуючої станції 4G і сусідньої, яка передає сигнал у стандарті 2G. На ньому спостерігаємо, що рівень сигналу 4G перебуває на рівні поганого сигналу (табл. 1), а сигнал 2G – на межі задовільного і хорошого (табл. 2). Отже, перевагу в надійності та стабільності зв'язку має стандарт 2G, а також використання технології DTMF.



Рис. 9. Сигнал від базової станції 4G і сусідньої 2G

Висновки. Незважаючи на всі переваги технології мережевого з'єднання LTE, в умовах низького рівня та якості сигналу від базової станції вона не забезпечує швидкого та певного виконання команд телекерування, створеного на її основі. Натомість технологія DTMF працює на межі втрати зв'язку, а швидкість передачі команди не залежить від якості сигналу. Використання DTMF доречно до появи в місці розташування підстанції якісного та впевненого зв'язку 4G з можливістю використання мережевого з'єднання LTE.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Плешков П. Г. Телемеханіка та автоматизовані системи управління в електроенергетиці: навч. посіб. Кіровоград : КНТУ, 2016. 10 с. <https://dSPACE.kntu.kr.ua/items/702f3b56-0abc-43e0-9343-2fc77a90ddb8>
2. LoRaAlliance. URL: <https://lora-alliance.org> (дата звернення: 15.08.2025).
3. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. M. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16 (9), 2016. P. 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
4. Винар А. А. Система віддаленого керування підключенням банківського обладнання через GSM-модулі. *Інформаційні технології та інженерія: тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. Молодих вчених, аспірантів і студентів. Миколаїв, 7–10 лютого 2023 р. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2023. С. 61–63. URL: <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2727/1/%d0%92%d0%b8%d0%bd%d0%b0%d1%80.pdf>*
5. Stuckmann P., Ehlers N., Wouters B. GPRS traffic performance measurements. In *Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference*. 2002. Vol. 2, pp. 1289–1293. <https://doi.org/10.1109/VETECF.2002.1040813>
6. Kher N., Boora K., Kumar V. DTMF-Based Digitally Controlled Home Automation: Hardware Experimentation and Implementation. *2023 International Conference on Recent Advances in Science and Engineering Technology (ICRASET)*, BG NAGARA, India. 2023, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICRASET59632.2023.10420182>
7. Oluwole A. S., Odekunle O. P., Olubakinde E. Applications and recent development of DTMF based technology in home automation. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 5(3), 2021. P. 60–67. <https://doi.org/10.24018/ejece.2021.5.3.328>
8. Sanjay M. Ladwa, R. Sudharshan Kaarthik, Alok Ranjan Dhara, Nayan Dalei: Control of remote domestic system using DTMF. *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering 2009*, Bandung, Indonesia, 2009. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICICI-BME.2009.5417279>
9. M. Weiner, M. Jorgovanovic, A. Sahai and B. Nikolić: Design of a low-latency, high-reliability wireless communication system for control applications. *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, NSW, Australia. 2014, pp. 3829–3835. <https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883918>
10. E. Soltanmohammadi, K. Ghavami and M. Naraghi-Pour: A Survey of Traffic Issues in Machine-to-Machine Communications Over LTE. in *IEEE Internet of Things Journal*. Dec. 2016. Vol. 3, no. 6. P. 865–884. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2533541>
11. CableFree 10+ Gigabit Wireless Networks. LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement. URL: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsq-measurement-lte> (дата звернення: 15.07.2025).
12. BLINKENLIGHT Ltd. URL: <https://bluespotnet.co.uk/pages/rssi> (дата звернення: 15.07.2025).
13. Document Control ID: SIM800 Series_AT Command Manual_V1.01. URL: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/sim800_series_at_command_manual_v1.01.pdf (дата звернення: 15.07.2025).
14. Venn Telecom. How to Interpret RSSI parameters in 2G, 3G and LTE routers. URL: <https://help.venntelecom.com/support/solutions/articles/44001930999-how-to-interpret-rssi-parameters-in-2g-3g-and-lte-routers> (дата звернення: 15.07.2025).

REFERENCES:

1. Plieskov, P. H., Serebrennikov, S. V., Petrova, K. H., Pleshkov, P. H., Serebrennykov, S. V., & Petrova, E. H. (2016). *Telemekhanikataavtomatyzovaniisystemyupravlinniavelektroenerhetytsi* [TelemechanicsandAutomated Control Systems in Electric Power Industry]: Ukraine. P. 10. Retrieved from <https://dSPACE.kntu.kr.ua/items/702f3b56-0abc-43e0-9343-2fc77a90ddb8>
2. LoRaAlliance. Retrieved from: <https://lora-alliance.org> (date of access: 15.08.2025).
3. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
4. Vynar, A. A. (2023). Systema viddalenooho keruvannia pidkliuchenniam bankivskoho obladdannia cherez GSM-moduli [A remote management system for bank equipment connectivity using GSM modules]. *Informatsiitekhnolohii ta inzheneriia: tezy dop. Vseukr. nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh, aspirantiv i studentiv*. Mykolaiv, 7–10 liutoho 2023 r. Mykolaiv: Chornom. nats. un-t im. Petra Mohyly, 2023. P. 61–63. Retrieved from <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2727/1/%d0%92%d0%b8%d0%bd%d0%b0%d1%80.pdf> [in Ukrainian].
5. Stuckmann, P., Ehlers, N., & Wouters, B. (2002, September). GPRS traffic performance measurements. In *Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference*. 2 (pp. 1289–1293). <https://doi.org/10.1109/VETECF.2002.1040813>

6. Kher, N., Boora, K., & Kumar, V. (2023). DTMF-Based Digitally Controlled Home Automation: Hardware Experimentation and Implementation. *2023 International Conference on Recent Advances in Science and Engineering Technology (ICRASET)*, B G NAGARA, India. (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/ICRASET59632.2023.10420182>
7. Oluwole, A. S., Odekunle, O. P., & Olubakinde, E. (2021). Applications and recent development of DTMF based technology in home automation. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 5(3), 60–67. <https://doi.org/10.24018/ejece.2021.5.3.328>
8. Sanjay M. Ladwa, R Sudharshan Kaarthik, Alok Ranjan Dhara, Nayan Dalei (2009). *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering 2009- ieeexplore.ieee.org* Control of remote domestic system using DTMF. <https://doi.org/10.1109/ICICI-BME.2009.5417279>
9. Weiner, M., Jorgovanovic, M., Sahai, A., & Nikolić, B. (2014). Design of a low-latency, high-reliability wireless communication system for control applications. *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, NSW, Australia. (pp. 3829–3835). <https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883918>
10. Da E. Soltanmohammadi, K. Ghavami and M. Naraghi-Pour (Dec. 2016). A Survey of Traffic Issues in Machine-to-Machine Communications Over LTE, in *IEEE Internet of Things Journal* 3(6). (pp. 865–884). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2533541>
11. CableFree 10+ Gigabit Wireless Networks. LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement. Retrieved from: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsq-measurement-lte> (date of access: 15.07.2025).
12. BLINKENLIGHT Ltd. URL: <https://bluespotnet.co.uk/pages/rssi> (date of access: 15.07.2025).
13. Document Control ID: SIM800 Series_AT Command Manual_V1.01. Retrieved from: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/sim800_series_at_command_manual_v1.01.pdf (date of access: 15.07.2025).
14. Venn Telecom. How to Interpret RSSI parameters in 2G, 3G and LTE routers. Retrieved from: <https://help.venntelecom.com/support/solutions/articles/44001930999-how-to-interpret-rssi-parameters-in-2g-3g-and-lte-routers> (date of access: 15.07.2025).

Стаття надійшла: 09.08.2025

Стаття прийнята: 26.08.2025

Опублікована: 10.11.2025

