

Прокопович-Ткаченко Д.І.

Університет митної справи та фінансів

Зубченко Н.С.

Університет митної справи та фінансів

Черкаський О.В.

Університет митної справи та фінансів

Деркач Я.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ОДНОРІВНЕВА P2P VOIP ТЕЛЕФОНІЯ: АРХІТЕКТУРА, ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Однорівнева (однорангова) P2P VoIP телефонія – це децентралізована технологія зв'язку, яка базується на прямій взаємодії між вузлами без централізованих серверів. Кожен пристрій у такій системі поєднує функції клієнта і сервера, забезпечуючи масштабованість, надійність, конфіденційність і ефективне використання мережевих ресурсів. Завдяки своїй архітектурі, P2P VoIP-мережі стійкі до зовнішніх атак, технічних збоїв і мають високу автономність. Відсутність єдиної точки відмови робить цю технологію одним із найперспективніших напрямів у телекомунікаціях.

Ключова перевага P2P VoIP полягає у зниженні затримок передачі даних завдяки прямій комунікації між вузлами. У традиційних централізованих системах з'єднання часто проходять через посередницькі сервери, що збільшує час передачі. Водночас у P2P-мережах цей недолік усувається, що підвищує якість зв'язку, зменшує ризик втрати пакетів і забезпечує стабільність навіть у нестабільних умовах. Така ефективність дозволяє впроваджувати P2P VoIP-системи в середовищах з обмеженими ресурсами, де доступ до традиційної інфраструктури є складним або неможливим.

Особливе значення однорангові системи мають у військових комунікаціях, системах екстремального зв'язку та рятувальних операціях. У таких умовах автономність, стійкість до перешкод і можливість роботи в обхід традиційних інфраструктур, таких як стільниковий чи супутниковий зв'язок, є критично важливими. Наприклад, у випадку стихійних лих P2P VoIP дозволяє рятувальним командам зберігати зв'язок навіть за повної відсутності традиційних засобів зв'язку.

Розвиток однорангових VoIP-систем є важливим кроком до створення більш стійких і безпечних телекомунікацій. Такі системи усувають проблеми централізованого зберігання даних, що часто є вразливим місцем традиційних мереж. Завдяки децентралізації забезпечується вищий рівень конфіденційності, що особливо актуально у світі, де захист інформації є пріоритетом. P2P VoIP виступає альтернативою централізованим моделям, відкриваючи нові стандарти у сфері зв'язку та закладаючи основу для майбутніх інновацій.

Ключові слова: P2P VoIP телефонія, децентралізація, масштабованість, конфіденційність, однорангова архітектура.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання вимог до конфіденційності, надійності та продуктивності телекомунікаційних систем централізовані архітектури зв'язку демонструють суттєві недоліки, такі як вразливість до зовнішніх загроз, технічних збоїв, кібератак і залежність від єдиної точки відмови. Це створює значні ризики, особливо у критичних галузях, таких як військові комунікації, системи екстреного зв'язку та рятувальні операції, де автономність і надійність є визначальними для успішного виконання

завдань. Також значними є затримки у передачі даних та високі витрати на підтримку традиційної мережевої інфраструктури, що стає бар'єром для впровадження ефективних рішень у середовищах з обмеженими ресурсами.

Практичне вирішення цих проблем пропонують однорангові (P2P) VoIP-архітектури, які ґрунтуються на децентралізованому підході до комунікацій. Вони забезпечують прямий обмін даними між вузлами мережі без використання централізованих серверів, що дозволяє усунути єдину

точку відмови, суттєво знизити затримки передачі даних та підвищити загальну продуктивність системи. Кожен пристрій у мережі виконує функції як клієнта, так і сервера, що забезпечує масштабованість, підвищену надійність і конфіденційність зв'язку.

Практична реалізація таких рішень може включати створення автономних P2P VoIP мереж для військових підрозділів, які здатні функціонувати незалежно від традиційних інфраструктур зв'язку, таких як супутникові чи стільникові мережі, особливо у кризових умовах. Також ці системи можуть бути впроваджені у сферах рятувальних операцій, де необхідна безперервна комунікація між підрозділами в умовах техногенних катастроф чи стихійних лих. Крім того, P2P VoIP технології є перспективними для зниження витрат у корпоративних мережах та впровадження у середовищах із високими вимогами до безпеки даних, наприклад у банківській сфері чи державних установах. Завдяки природній децентралізації та оптимізації ресурсів ці системи стають основою для переходу до більш стійких, безпечних і ефективних технологій комунікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. VoIP (Voice over IP) технології є ключовим елементом сучасних телекомунікацій. У роботі Гартпенса "Пакетний посібник із VoIP" представлено огляд базових принципів VoIP, що включають використання пакетної передачі даних для голосових комунікацій. Автор акцентує увагу на особливостях налаштування мережевої інфраструктури та протоколів SIP і RTP [1, с. 15]. Це дозволяє системним адміністраторам ефективно впроваджувати VoIP у корпоративних мережах.

Питання кібербезпеки займає центральне місце у дослідженнях VoIP. У книзі Двіведі "Злам VoIP" детально розглянуто вразливості систем VoIP, зокрема протоколи SIP та H.323, а також описані атаки на рівні сигналізації та передачі даних. Крім того, запропоновані методи протидії, що включають шифрування та автентифікацію [2, с. 48]. Ендлер і Колліер у роботі "Злам VoIP" також розкривають проблеми безпеки. Автори підкреслюють важливість моніторингу мережевого трафіку для виявлення підозрілих активностей, таких як DoS-атаки [3, с. 72].

Протокол SIP є основою для встановлення та завершення VoIP-з'єднань. У книзі Сінрайха та Джонстона "Інтернет-комунікації із використанням SIP" наведено технічні аспекти роботи SIP-протоколу та його інтеграції з мультимедійними сервісами. Автори також розглядають сценарії

впровадження SIP у мережі корпоративного та публічного доступу [4, с. 102].

У книзі "FreeSWITCH 1.8: Вичерпне джерело" Мінесейла описані інструменти для побудови систем VoIP. Автор пояснює налаштування FreeSWITCH як серверної платформи для підтримки голосових і відеозв'язків [5, с. 45]. Ця робота корисна для розробників, які прагнуть створювати масштабовані системи зв'язку.

Ахсон та Іляс у "Довіднику з VoIP" висвітлюють питання надійності та безпеки систем голосового зв'язку. Особливу увагу приділено методам шифрування та впровадженню захищених мережевих протоколів, таких як SRTP [6, с. 83].

Фланаган у своїй роботі "VoIP та уніфіковані комунікації" розглядає перспективи розвитку VoIP-технологій у контексті переходу до уніфікованих комунікацій. Автор пропонує інтеграцію голосових сервісів із хмарними рішеннями, що дозволяє забезпечити високу масштабованість та гнучкість систем [7, с. 125].

Герсент, Петі та Гурле у книзі "Поza протоколами VoIP" досліджують використання VoIP у кризових ситуаціях. Автори аналізують можливість застосування систем IP-телефонії для створення стійких мереж під час катастроф, особливо в умовах обмеженого доступу до традиційної інфраструктури [8, с. 56].

Постановка завдання. Метою цієї публікації є дослідження та обґрунтування рішень для підвищення надійності VoIP-комунікацій в умовах дефіциту енергопостачання. Основна увага приділяється розробці ефективних архітектур, таких як однорангова (P2P) VoIP, які дозволяють зменшити залежність від централізованих серверів та мінімізувати споживання енергії за рахунок оптимізації мережевої взаємодії. Для досягнення цієї мети стаття спрямована на аналіз впливу дефіциту енергопостачання на роботу VoIP-систем та визначення основних факторів ризику для комунікаційних мереж. Особливу увагу приділено розробці децентралізованої P2P VoIP-архітектури, яка забезпечує підвищену надійність за рахунок усунення єдиної точки відмови та розподілу функцій між вузлами мережі. Математично обґрунтовується підвищення надійності комунікацій у децентралізованих мережах порівняно з традиційними централізованими системами. У рамках дослідження також розроблено рекомендації щодо впровадження енергоефективних рішень для підтримки VoIP-комунікацій у кризових умовах. Ця публікація спрямована на створення науково-практичної бази для адаптації

VoIP-технологій до умов нестабільного енергопостачання, що особливо важливо для критичних галузей, таких як військові комунікації, екстрені служби та рятувальні операції.

Виклад основного матеріалу. Однорівнева P2P VoIP архітектура забезпечує децентралізацію шляхом рівноправної участі всіх вузлів у передачі даних. Кожен вузол мережі одночасно виконує функції клієнта і сервера, що усуває необхідність у центральному сервері, який є єдиною точкою відмови в централізованих системах. Такий підхід дозволяє знизити затримки передачі даних завдяки прямій взаємодії між кінцевими вузлами, підвищити загальну надійність системи та забезпечити конфіденційність передачі даних, адже немає централізованого місця для перехоплення інформації [1, с. 20]. Це робить архітектуру особливо актуальною для критичних умов, таких як військові комунікації, де автономність і стабільність зв'язку є визначальними параметрами для успішного виконання завдань.

Для перевірки ефективності запропонованої архітектури була розгорнута однорангова мережа з використанням п'яти телефонних апаратів, з'єднаних через 100 Мбітні Ethernet-лінії. У рамках цієї мережі була реалізована зіркова топологія, що забезпечує повне резервування каналів передачі даних [2, с. 36]. Такий підхід дозволяє зберігати працездатність мережі навіть у разі виходу з ладу одного або декількох вузлів. Кожен апарат мав можливість одночасно підтримувати зв'язок із усіма іншими вузлами через резервні маршрути, що значно підвищує стійкість системи до збоїв [3, с. 48].

На кожному телефонному апараті був налаштований SIP-протокол, що дозволило організувати зв'язок без використання цифрової АТС. Це рішення повністю виключило з архітектури мережі вразливий елемент – централізовану АТС, яка могла б стати ціллю для атак чи точкою відмови системи [4, с. 75]. Відсутність центрального вузла унеможливило порушення роботи всієї мережі через технічні збої чи зловмисні дії, що робить запропоновану систему більш стійкою та безпечною.

Запропонована топологія була продумана для забезпечення максимальної надійності у реальних умовах, таких як військові дії чи екстрені ситуації, де зовнішні фактори, такі як пошкодження ліній зв'язку чи локальні збої у роботі обладнання, можуть значно ускладнити комунікацію. Розгортання такої мережі продемонструвало її здатність забезпечувати безперервний зв'язок навіть при

умовах високого навантаження на канали передачі даних [5, с. 125]. Низькі затримки у передачі сигналу, виключення централізованого елемента та стійкість до відмов вузлів підтвердили ефективність децентралізованого підходу в умовах, що вимагають високої надійності та конфіденційності [6, с. 92].

Розглянута мережева схема ілюструє реалізацію однорангової (P2P) VoIP мережі на основі зіркової топології з резервуванням. Ця мережа була розроблена для забезпечення високої надійності зв'язку в умовах, де критично важлива безперервна передача даних і мінімізація впливу зовнішніх факторів, таких як збої в лініях зв'язку або відмова обладнання. Особлива увага приділялася зниженню залежності від централізованих елементів і забезпеченню прямого зв'язку між вузлами (рис. 1).

Основні елементи схеми:

1. Центральний вузол виконує роль хабу для передачі даних між телефонними апаратами, забезпечуючи зв'язок між усіма вузлами.
2. Телефонні апарати (Телефон 1, Телефон 2, Телефон 3, Телефон 4, Телефон 5) підключені до центрального вузла через основні лінії зв'язку.
3. Резервні з'єднання, що додають додаткову стійкість до мережі, дозволяють зберігати зв'язок навіть у випадку відмови основної лінії.

Детальний опис:

1. Зіркова топологія: Основне з'єднання між центральним вузлом і телефонними апаратами забезпечує швидкий і прямий обмін даними.
2. Резервування: Кожен телефонний апарат підключений до мережі через дві лінії зв'язку: основну та резервну. У випадку пошкодження однієї лінії, мережа автоматично перемикається на резервний шлях, що дозволяє уникнути розриву зв'язку.
3. Масштабованість: Архітектура дозволяє легко додавати нові вузли без необхідності значних змін у структурі мережі.
4. Енергоефективність: Відсутність складної центральної АТС знижує енергоспоживання, що є критичним у ресурсно обмежених умовах.

Переваги схеми

Наявність резервування для кожного апарату, до якого підходять дві незалежні лінії, значно підвищує надійність зв'язку, оскільки система залишається функціональною навіть при збої основного каналу. Такий підхід забезпечує високу стабільність і стійкість мережі до зовнішніх впливів, що робить цю схему особливо актуальною для військових або екстрених комунікацій.

Мережева схема P2P VoIP з резервуванням

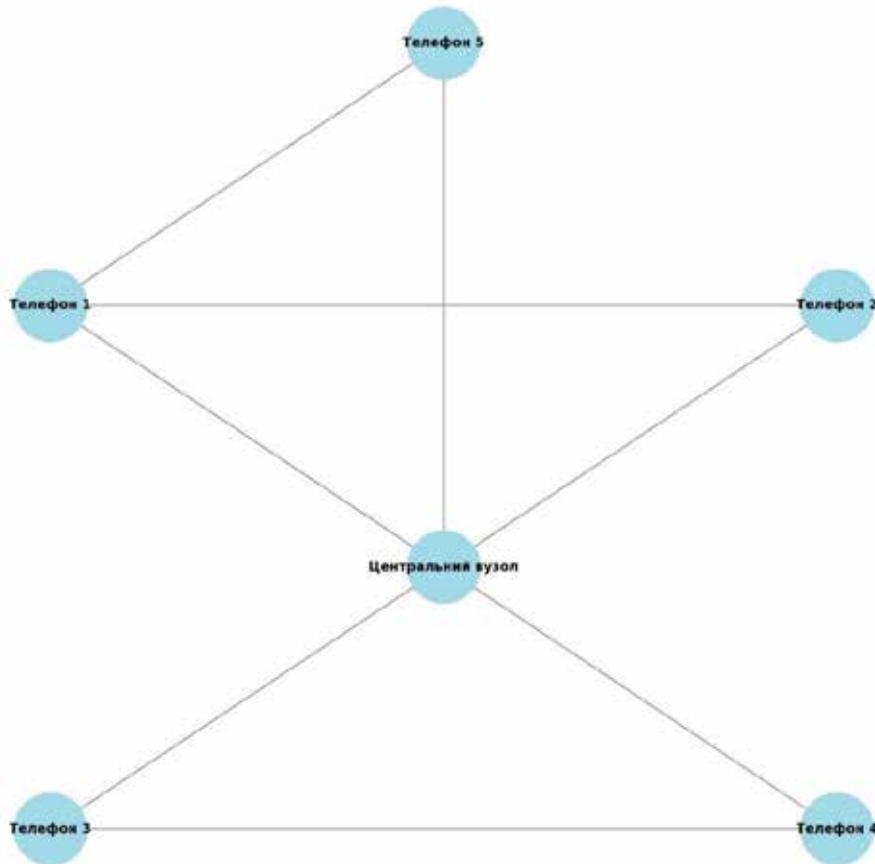
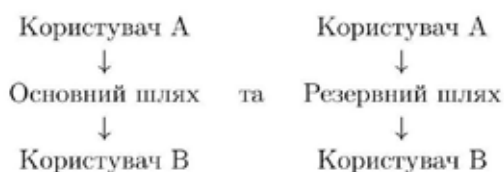


Рис. 1. Мережева топологія складається з центрального вузла, до якого підключені п'ять телефонних апаратів за допомогою Ethernet-ліній зі швидкістю 100 Мбіт/с.

Для розрахунку підвищення надійності та зниження відмов у VoIP мережі з резервуванням, розглянемо просту мережеву схему з двома шляхами передачі даних (основний та резервний).

Мережева схема P2P VoIP з резервуванням



Розрахунок надійності

Позначимо:

- R_1 – надійність основного шляху,
- R_2 – надійність резервного шляху.

Надійність системи з резервуванням обчислюється за формулою:

$$R_{\text{система}} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$$

Припустимо, що надійність основного шляху $R_1 = 0.95$ і надійність резервного шляху $R_2 = 0.90$.

Тоді:

$$R_{\text{система}} = 1 - (1 - 0.95)(1 - 0.90)$$

$$R_{\text{система}} = 1 - (0.05)(0.10)$$

$$R_{\text{система}} = 1 - 0.005$$

$$R_{\text{система}} = 0.995$$

Розрахунок відмов

Ймовірність відмови системи $F_{\text{система}}$ обчислюється як:

$$F_{\text{система}} = 1 - R_{\text{система}}$$

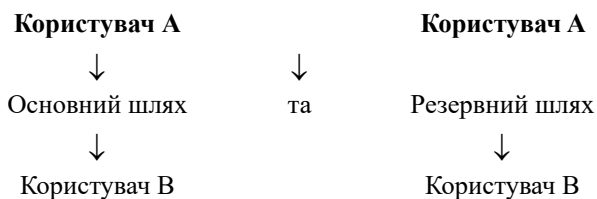
Тоді:

$$F_{\text{система}} = 1 - 0.995$$

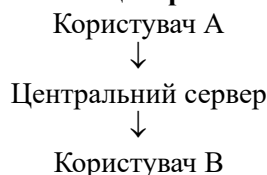
$$F_{\text{система}} = 0.005$$

Висновок

Використання резервного шляху значно підвищує надійність VoIP мережі з 0.95 до 0.995, що знижує ймовірність відмови з 0.05 до 0.005. Це означає, що система з резервуванням є більш надійною і менш схильною до відмов.

Візуалізація

Таким чином, резервування в мережі VoIP значно підвищує її надійність. Для порівняння надійності та ймовірності відмови телефонної мережі з центральним сервером, розглянемо схему, де центральний сервер є єдиною точкою відмови.

Мережева схема з центральним сервером**Розрахунок надійності**

Позначимо:

- $R_{\text{сервер}}$ – надійність центрального сервера,
- $R_{\text{лінія}}$ – надійність лінії зв'язку між користувачами та сервером.

Надійність системи з центральним сервером обчислюється як добуток надійностей всіх компонентів:

$$R_{\text{система}} = R_{\text{сервер}} \cdot R_{\text{лінія}}^2$$

Припустимо, що надійність центрального сервера $R_{\text{сервер}} = 0.98$ і надійність кожної лінії зв'язку $R_{\text{лінія}} = 0.95$.

Тоді:

$$R_{\text{система}} = 0.98 \cdot (0.95)^2$$

$$R_{\text{система}} = 0.98 \cdot 0.9025$$

$$R_{\text{система}} \approx 0.88445$$

Розрахунок відмов

Ймовірність відмови системи $F_{\text{система}}$ обчислюється як:

$$F_{\text{система}} = 1 - R_{\text{система}}$$

Тоді:

$$F_{\text{система}} = 1 - 0.88445$$

$$F_{\text{система}} \approx 0.11555$$

Показник	P2P VoIP з резервуванням	Телефонна мережа з центральним сервером
Надійність системи R	0.995	0.88445
Ймовірність відмови F	0.005	0.11555

Порівняння

Мережа P2P VoIP з резервуванням має значно вищу надійність (0.995) порівняно з телефонною мережею з центральним сервером (0.88445). Відповідно, ймовірність відмови в мережі P2P VoIP з резервуванням (0.005) значно нижча, ніж у телефонній мережі з центральним сервером (0.11555). Це свідчить про те, що використання резервування в P2P VoIP мережі значно підвищує її надійність і знижує ймовірність відмови.

Висновки. Однорівнева P2P VoIP телефонія продемонструвала високу надійність завдяки децентралізованій архітектурі, яка усуває єдину точку відмови та забезпечує функціонування мережі навіть при збої окремих вузлів. Резервування з'єднань значно знижує ймовірність відмови системи, що особливо актуально для критичних умов використання, таких як військові чи екстрені комунікації. Відсутність центрального сервера не лише зменшує витрати на створення та підтримку інфраструктури, а й сприяє економії енергії. Це особливо важливо в умовах дефіциту енергоресурсів, де стабільність і ефективність системи мають вирішальне значення. Архітектура P2P VoIP забезпечує легке масштабування мережі, дозволяючи додавати нові вузли без значних змін у структурі. Це робить технологію перспективною для впровадження у різних галузях, включаючи корпоративні мережі, екстрені служби та системи рятувальних операцій. Завдяки можливості працювати без доступу до централізованої інфраструктури, P2P VoIP є ефективним рішенням для регіонів з обмеженим доступом до ресурсів.

Додатково слід зазначити, що на запропоновану архітектуру однорангової P2P VoIP телефонії було подано заявку на патент у формі корисної моделі. Реєстраційний номер заявки – **202405663**, дата подання – **29.11.2024**. Назва винаходу: **“Однорівнева P2P VoIP телефонія: архітектура, переваги та перспективи застосування”**. Це підтверджує наукову новизну та практичну значущість запропонованого рішення, а також його унікальність у сфері телекомунікаційних технологій.

Заявка була подана до **Українського національного офісу інтелектуальної власності та інновацій (УкрНІОІВ)**, що свідчить про прагнення авторів забезпечити правовий захист результатів своєї наукової та інженерної діяльності.

Список літератури:

1. Bart P. Packet Guide to VoIP: A System Administrator's Guide to VoIP Technologies. DOI: 10.5555/2591514. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/packet-guide-to/9781449339661/> (дата звернення: 14.12.2024).
2. Sinreich H., Johnston A. Internet Communications Using SIP: Delivering VoIP and Multimedia Services with Session Initiation Protocol. DOI: 10.1002/0470045298. URL: <https://surl.li/teaqiq> (дата звернення: 14.12.2024).
3. Endler D., Collier M. Hacking VoIP: VoIP Security Secrets and Solutions. DOI: 10.1036/0072263649. URL: <https://www.mhprofessional.com/9780072263641> (дата звернення: 14.12.2024).
4. Collier M., Endler D. Hacking Exposed Unified Communications & VoIP: VoIP Security Secrets & Solutions, Second Edition. DOI: 10.1036/0071795836. URL: <https://www.mhprofessional.com/9780071795839> (дата звернення: 14.12.2024).
5. Flanagan W.A. VoIP and Unified Communications: Internet Telephony and the Future Voice Network. DOI: 10.1002/9781119942904. URL: <https://surl.li/mvpeza> (дата звернення: 14.12.2024).
6. Ahson S.A., Ilyas M. VoIP Handbook: Applications, Technologies, Reliability, and Security. DOI: 10.1201/9781420066050. URL: <https://surl.li/ewizpd> (дата звернення: 14.12.2024).
7. Gershen O., Petit J.-P., Gourle D. Beyond VoIP Protocols: Understanding Voice Technology and Networking Techniques for IP Telephony. DOI: 10.1002/0470023629. URL: <https://surl.li/vvvzhv> (дата звернення: 14.12.2024).
8. Bates R.J. Securing VoIP: Keeping Your VoIP Network Safe. DOI: 10.1016/B978-1-59749-060-3.X5000-0. URL: <https://surl.li/vkqryf> (дата звернення: 14.12.2024).

Prokopovych-Tkachenko D.I., Zubchenko N.S., Cherkaskyi O.V., Derkach Ya.O. PEER-TO-PEER VOIP TELEPHONY: ARCHITECTURE, ADVANTAGES, AND PROSPECTS OF APPLICATION

Peer-to-peer (P2P) VoIP telephony is a decentralized communication technology based on direct interaction between nodes without centralized servers. Each device in such a system combines the functions of a client and a server, ensuring scalability, reliability, confidentiality, and efficient use of network resources. Due to its architecture, P2P VoIP networks are resilient to external attacks, technical failures, and operate autonomously. The absence of a single point of failure makes this technology one of the most promising directions in telecommunications.

The key advantage of P2P VoIP lies in reducing data transmission delays through direct communication between nodes. In traditional centralized systems, connections often pass through intermediary servers, increasing transmission time. In P2P networks, this drawback is eliminated, enhancing call quality, reducing packet loss risks, and ensuring stability even under challenging conditions. Such efficiency allows the deployment of P2P VoIP systems in resource-constrained environments where access to traditional infrastructure is limited or unavailable.

Peer-to-peer systems are particularly significant in military communications, emergency response, and rescue operations. In these scenarios, autonomy, resilience to disruptions, and the ability to function without traditional infrastructures like cellular or satellite communications are critically important. For instance, during natural disasters, P2P VoIP enables rescue teams to maintain communication even when conventional means of communication are completely unavailable.

The development of peer-to-peer VoIP systems is an essential step toward creating more robust and secure telecommunications. These systems address the challenges of centralized data storage, which is often a weak point of traditional networks. Decentralization provides a higher level of privacy, a critical feature in a world where information security is a priority. P2P VoIP stands as an alternative to centralized models, introducing new standards in communications and laying the foundation for future innovations.

Key words: P2P VoIP telephony, decentralization, scalability, confidentiality, peer-to-peer architecture.