

**ГРАНИЧНА КІЛЬКІСТЬ АБОНЕНТІВ АСУ
В НИЗЬКОШВИДКІСНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ
ЗАЛЕЖНО ВІД РЕЖИМУ РОБОТИ РАДІОСТАНЦІЇ**

Стрелковська І. В.

*доктор технічних наук, професор,
декан факультету кібербезпеки, програмної інженерії та
комп'ютерних наук
Міжнародний університет
м. Одеса, Україна*

Золотухін Р. В.

*аспірант спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення
Міжнародний університет
м. Одеса, Україна*

АСУ державного рівня низової ланки управління з активним переміщенням користувачів функціонують у мережах зв'язку на базі ультракороткохвильових (УКХ) радіостанцій та використовують протоколи JDSS стандарту STANAG 4677 і ADatP-36 для обміну даними [1]. Сучасні УКХ радіостанції підтримують три основних режими роботи: вузькосмуговий з фіксованою несучою частотою (FF), вузькосмуговий з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти – ППРЧ та широкосмуговий. Дослідження QoS-характеристик цих режимів [2] показали, що вони суттєво відрізняються між собою за пропускну здатністю, затримкою та джитером передачі даних.

При плануванні систем зв'язку АСУ одним із ключових завдань є визначення максимальної кількості абонентів (сервісів), яку мережа здатна обслуговувати з гарантованим рівнем якості. Перевищення цієї межі призводить до різкого зростання втрат пакетів та зниження ймовірності обслуговування нижче допустимого рівня. Разом з тим порівняльний аналіз граничної кількості абонентів для різних режимів роботи УКХ радіостанцій у науковій літературі відсутній.

Метою роботи є визначення граничної кількості одночасно активних сервісів JDSS та ADatP-36 в АСУ для трьох режимів роботи сучасних УКХ радіостанцій на основі імітаційного моделювання.

Для проведення дослідження використано програмну імітаційну модель трафіку, розроблену в [3, 4]. Генератор трафіку формує інтервали між вимогами на обслуговування згідно з розподілом Вейбула з параметрами $k \approx 0,43$, $\lambda \approx 0,34$ [1]. Ймовірність обслуговування обчислюється за формулою $P_{\text{обс}} = N_{\text{обс}} / (N_{\text{обс}} + N_{\text{втр}})$, де $N_{\text{обс}}$ – кількість обслужених пакетів,

$N_{\text{втр}}$ – загальна кількість втрачених пакетів. Фіксовані параметри моделювання: розмір буфера – 50 кБайт, гранична $P_{\text{обс}} = \geq 0,8$, ймовірність втрат у каналі – 2%, час очікування в буфері – 4 с, кількість пакетів – 100 000 (для режиму ППРЧ – 10 000 через надзвичайно малу пропускну здатність каналу). Для моделювання використано такі узагальнені значення пропускну здатності за результатами вимірювань [2, 5]: FF – 97 кбіт/с, ППРЧ (режим QL1A) – 16 кбіт/с, ширококутовий (режим ANW2C) – 350 кбіт/с.

Режим ППРЧ. Для вузькосмугового режиму з псевдовипадковою перебудовою частоти результати моделювання наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати імітаційного моделювання режиму ППРЧ

Сервіси	Середня смуга, кбіт/с	Втрати в каналі, пак.	Переповнення буфера, пак.	Таймаут буфера, пак.	$P_{\text{обс}}$ %
1	8,91	118	0	957	89,26
2	19,05	88	0	3 040	68,72

При 1 сервісі середній трафік (8,91 кбіт/с) знаходиться в межах пропускну здатності каналу, а основною причиною втрат є таймаут пакетів у буфері (957 пакетів), що обумовлено великим джитером режиму ППРЧ. При збільшенні до 2 сервісів середній трафік (19,05 кбіт/с) перевищує сміність каналу (16 кбіт/с), що призводить до накопичення пакетів у буфері та різкого зниження $P_{\text{обс}}$ до 68,72%. Гранична кількість сервісів для режиму ППРЧ становить 1.

Режим FF (фіксована частота). У табл. 2 показано граничну область переходу ймовірності обслуговування.

Таблиця 2

Результати імітаційного моделювання режиму фіксованої частоти

Сервіси	Середня смуга, кбіт/с	Втрати в каналі, пак.	Переповнення буфера, пак.	Таймаут буфера, пак.	$P_{\text{обс}}$ %
10	90,82	1 379	286	10 334	88,01
11	101,70	1 434	175	20 020	78,37

При 10 сервісах середня смуга (90,82 кбіт/с) наближається до граничної пропускну здатності, $P_{\text{обс}} = 88,01\%$. При збільшенні до 11 сервісів середня смуга перевищує 100 кбіт/с, кількість пакетів, що перевищили час очікування в буфері, зростає майже вдвічі – з 10 334 до 20 020, а $P_{\text{обс}}$ знижується до 78,37%. Гранична кількість сервісів для режиму FF становить 10.

Ширококутовий режим. Для ширококутового режиму було проведено серію симуляцій від 5 до 50 сервісів. У табл. 3 наведено результати в граничній зоні (30–45 сервісів), оскільки при кількості до 25 сервісів $P_{\text{обс}}$ стабільно перевищувала 97 %.

Таблиця 3

Результати імітаційного моделювання широкосмугового режиму

Сервіси	Середня смуга, кбіт/с	Втрати в каналі, пак.	Переповнення буфера, пак.	Таймаут буфера, пак.	$P_{\text{обс}}$, %
30	276,91	1 781	306	727	97,19
35	327,50	1 699	1 723	3 258	93,32
40	369,63	1 636	4 631	6 264	87,47
45	418,42	1 568	9 487	9 340	79,62

При 40 сервісах середня смуга (369,63 кбіт/с) незначно перевищує пропускну здатність каналу (350 кбіт/с), проте $P_{\text{обс}} = 87,47\%$ залишається вище порогу – завдяки буферизації пікових навантажень. При 45 сервісах середня смуга зростає до 418,42 кбіт/с, втрати через переповнення та таймаут буфера різко збільшуються, а $P_{\text{обс}}$ знижується до 79,62%. Гранична кількість сервісів для широкосмугового режиму становить 40.

Зведені результати для трьох режимів роботи УКХ радіостанції наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Гранична кількість сервісів АСУ

Режим	Пропускна здатність, кбіт/с	Гранична кількість сервісів	$P_{\text{обс}}$ на межі, %
ППРЧ	16	1	89,26
Фікс. частота	97	10	88,01
Широкосмуговий	350	40	87,47

Отримані результати свідчать про те, що гранична кількість абонентів зростає зі збільшенням пропускну здатності каналу, однак механізм деградації системи у кожному режимі має свою специфіку. У режимі ППРЧ визначальним фактором є великий джитер, через що основну частку втрат формує надмірне знаходження пакетів в буфері навіть при незначному навантаженні. У режимах фіксованої частоти та широкосмуговому деградація настає внаслідок поєднання переповнення буфера та надмірного знаходження пакетів в буфері у момент перевищення середнього трафіку над пропускну здатністю каналу.

Висновки

1. На основі імітаційного моделювання трафіку протоколів JDSS та ADataP-36 визначено граничну кількість одночасно активних сервісів АСУ для трьох режимів роботи сучасних УКХ радіостанцій при допустимому порозі ймовірності обслуговування 80 %: ППРЧ – 1 сервіс, фіксованої частоти – 10 сервісів, широкосмуговий – 40 сервісів.

2. Встановлено, що в режимі ППРЧ основною причиною втрат є надмірне знаходження пакетів в буфері, обумовлений великим джитером і середнім часом ICMP-відповіді. У режимах фіксованої частоти та широкосмуговому деградація якості обслуговування настає внаслідок

перевищення середнього трафіку над пропускнуою здатністю каналу, що призводить до одночасного зростання переповнення буфера та надмірного знаходження пакетів в буфері.

3. Отримані результати надають проєктувальникам АСУ кількісний критерій для вибору режиму роботи УКХ радіостанції залежно від необхідної кількості абонентів (сервісів) системи.

Література:

1. Strelkovskaya I. V., Zolotukhin R. V., Makoganiuk A. O. Modeling of telecommunication components of automated control systems in low-bandwidth radio networks. In: *Current Trends in Communication and Information Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, 2021. P. 150–170. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_9.

2. Strelkovskaya I., Zolotukhin R., Pascalenko V. Research of audio and video traffic the characteristics in low-bandwidth radio communication networks. *Measuring and computing devices in technological progresses*. 2023. № 4. P. 183–190. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-26>.

3. Стрелковська І. В., Золотухін Р. В., Стрелковська Ю. О. Програмна модель трафіку стандарту STANAG-4677 в автоматизованих системах управління. Відновлення України: міжгалузевий теоретико-прикладний аналіз та потенціали розвитку: матеріали Міжнар. наук.-практ. форуму (11 квітня 2025 р.). Львів–Торунь: Liha-Pres, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-491-0-39>.

4. Strelkovskaya I., Zolotukhin R. Simulation Modeling Algorithm of Low-Bandwidth Radio Network of Automated Control Systems. In: *Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIIT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1338. Springer, Cham, 2025. P. 17–33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_2.

5. Стрелковська І. В., Золотухін Р. В., Стрелковська Ю. О. Методика прогнозування кількості абонентів автоматизованої системи управління в низькошвидкісних радіомережах зв'язку. *Передові технології в інформаційно-комунікаційній інженерії (ATICE'2025): зб. матеріалів міжнар. конф. (зимовий форум)*. Одеса: Міжнародний університет, 2025. С. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.31379>.