

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ

Розглядаються мережі MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) [1] – динамічна самоорганізуюча архітектура побудови мобільних радіомереж (МР), що припускає відсутність фіксованої мережної інфраструктури (базових станцій) і централізованого управління. Особливу привабливість дані мережі одержали з появою недорогих бездротових мережеских рішень (стандарт IEEE 802.11, технології HiperLAN/2, Bluetooth). Всі вузли (хости) мережі мобільні й обмінюються інформацією безпосередньо між собою чи застосовують ретрансляцію пакетів. Під вузлом мережі розуміється радіотерминал (переносний комп'ютер, персональний секретар, які оснащені радіомодемом) із функціями маршрутизатора. Класичними прикладами МР є мережі військового призначення (оперативно-тактичного рівня) [2] і мережі забезпечення національної безпеки в кризових ситуаціях. Інші сценарії застосування даних мереж включають: персональні мережі зв'язку для будинку чи офісу; сенсорні мережі; проведення конференцій, олімпіад, виставок; навчання у віртуальних класах тощо.

Дані мережі характеризуються: високою динамікою топології, значною розмірністю, низькою пропускнуою здатністю радіоканалів (у порівнянні зі стаціонарними мережами), неоднорідністю (обмеженими ресурсами потужності та продуктивності частини вузлів), високою щільністю їхнього розміщення й ін.

Вихідними даними для моделювання є [3]:

### 1. Параметри МР:

- розмірність мережі:  $N$  – число вузлів мережі, її діаметр  $d$  і площа розміщення;
- параметри вузлів і радіоканалів мережі, описані на різних рівнях представлення: фізичному (частота  $f$ , вид модуляції, потужність передавача  $p_i$ , параметри антен тощо); каналному (тип протоколу доступу до каналу; метод організації радіоканалу – частотний, часовий, кодовий; швидкість передачі в каналі, співвідношення симетричних і асиметричних каналів тощо); мережному (досліджуваний метод маршрутизації, метод керування навантаженням); транспортному; апаратурному (обсяг буферів, параметри процесора тощо); оперативному (співвідношення кількості вузлів за величиною мобільності, кількість вузлів і час їхньої роботи в режимі мовчання й ін.);
- вихідні варіанти топології МР (вихідні координати розміщення  $i$ -х вузлів на місцевості  $x_i, y_i$ ;  $\bar{c}$  – середній ступінь зв'язності вузла мережі) і сценарії її поводження:  $v$  – величина топологічних змін мережі (швидкість  $v_i$  і напрямок  $\gamma_i$  переміщення вузлів, інтенсивність відмов радіоканалів і вузлів внаслідок вогневого чи радіоелектронного впливу супротивника).

### 2. Параметри інформаційного обміну в мережі:

- вимоги до якості інформаційного обміну:  $t_{\text{зmax}}^{\xi}$  – граничне значення часу затримки передачі повідомлень  $\xi$ -го типу,  $\xi = \overline{1, \Xi}$ ;  $p_{\text{ош}}^{\xi}$  – імовірність його помилки;
- $\Gamma = \left\| g_{ij}^{\xi}(t) \right\|$  – значення вхідного трафіка  $\xi$ -го типу між  $i$ -м і  $j$ -м абонентами в момент часу  $t$ .

3. Параметри досліджуваних методів маршрутизації (клас, функції  $U_\rho = \{U_\rho^c, U_\rho^x, U_\rho^b, U_\rho^p\}$ ,  $\rho = \overline{1, P}$ ) [4, 5]. Основні з них: для табличних методів – період розсилання маршрутних повідомлень  $\Delta t_{пр}$ , час їх чекання  $t_ч$ ; період очікування зв'язності  $t_{поз}$ ; для зондових – граничний час побудови маршруту  $t_{пмакс}$ , початкове значення глибини розсилання зондів  $r_n$ , приріст  $\Delta r$ , час підтримки маршруту  $t_{пд}$ ; для гібридного – початкове значення маршрутної зони  $R_{мз}$  тощо.

Багато факторів (мобільність вузлів, протоколи каналного і мережного рівней, розмірність мережі тощо) впливають на показники ефективності МР: пропускну здатність  $S$ , обсяг службового трафіка  $V_{ст}$ , середня потужність передачі вузлів  $P$  і ін. Проведемо дослідження залежностей показників ефективності ( $S, V_{ст}, P$ ) від наступних параметрів: розмірності мережі  $N$ ; величини топологічних змін  $v$ ; і вхідного навантаження  $\Gamma$  та методу маршрутизації  $U_\rho$ .

Варіант вихідної топології мережі, яка моделюється, представлений на рис. 1.

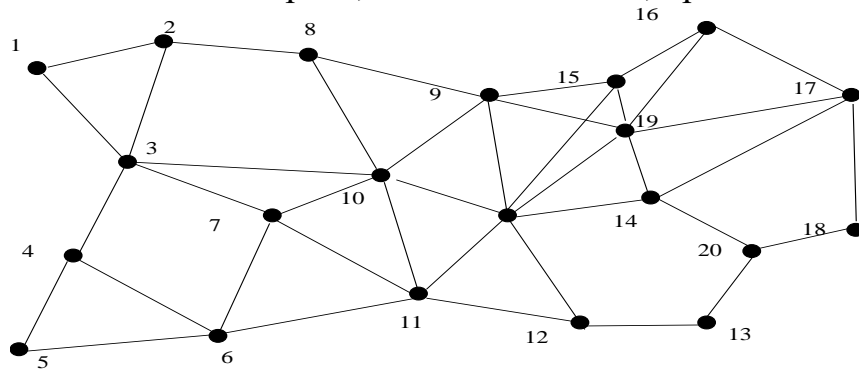


Рис. 1. Приклад вихідної топології МР

Для спрощення аналізу вхідне навантаження  $\Gamma$  мережі генерується з постійною інтенсивністю. Кожна пара відправник-адресат вибирається рівномірно випадковим образом із всіх вузлів мережі. Розмір переданих пакетів, швидкість передачі в радіоканалі фіксовані. Збільшення навантаження моделюється збільшенням числа пар відправник-адресат.

Величина топологічних змін може бути представлена різними моделями: випадкова, випадкова з зупинками, групова тощо [5]. Для МР модель мобільності вузлів найбільш повно описується випадковою моделлю із зупинками. Зміни радіоканалів (відповідно маршрутів) залежать, в основному, від величини швидкості переміщення мобільних абонентів  $v$  (військовослужбовці, транспортні засоби, літальні апарати) і величиною зупинки  $t_{зп}$ . Усі методи маршрутизації у МР повинні адаптуватися до змін топології. Існують визначені труднощі безпосереднього керування зміною топології при моделюванні. Оцінимо взаємодію між зміною топології і мобільністю вузлів із використанням лінійного регресійного аналізу [6]

$$Y = b_0 + b_1 X, b_1 = (\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}) / \sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2, b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}.$$

На рис. 2 і рис. 3 показано, що кількість змін каналів  $N_{зк}$  і маршрутів  $N_{зм}$  описуються лінійною функцією від максимальної швидкості вузлів  $v_{макс}$  (наприклад, для  $t_3 = 10с$ ) і лінійною функцією від величини  $t_3$  (при  $v_{макс} = 5$ ). Перевіримо значимість оцінок коефіцієнтів регресії. Для цього перевіримо гіпотезу про рівність нулю коефіцієнта регресії, дотримуючись передумови “нормальний регрес”. У цьому

випадку статистика  $t = b_1 \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} / \hat{\sigma}$ , що обчислюється для перевірки нульової гіпотези  $H_0: b_1 = 0$  має розподіл Стюдента з  $k = n - 2$  ступенями волі  $\hat{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - 2)$ . Для зміни каналів відносно швидкості значення  $|t| = 24.1455$ , для зміни маршрутів щодо швидкості  $|t| = 21.1927$ . Табличне значення  $t$ -критерію для рівня значимості 0.01  $t_{0.01}(10) = 3.169$  [7]. Отже, нульову гіпотезу про рівність нулю коефіцієнтів регресії варто відкинути. Коефіцієнти регресії значимі. Довірчі інтервали для коефіцієнтів регресії для рівня значимості в 0.05 представлені на рис. 2.

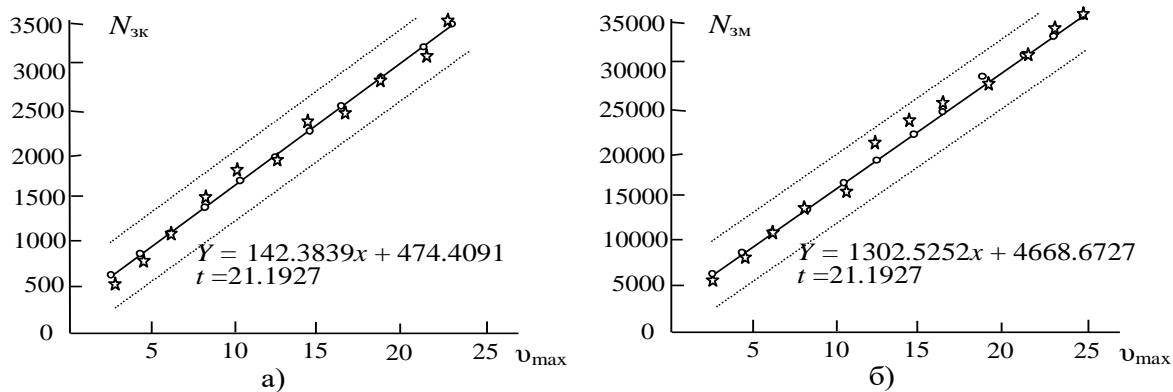


Рис. 2. Залежності зміни топології МР від величини мобільності вузлів

На рис. 3 показані лінійні регресії  $N_{зк}$  зміни каналів і маршрутів у залежності від величини зупинки вузлів. Аналогічно перевіримо нульову гіпотезу  $t_{0.01}(4) = 4.604$  при  $|t|$  рівному 9.1826 і 8.0857, відповідно. Таким чином, гіпотезу  $H_0$  відкидаємо, рівняння регресії вважаємо значимим.

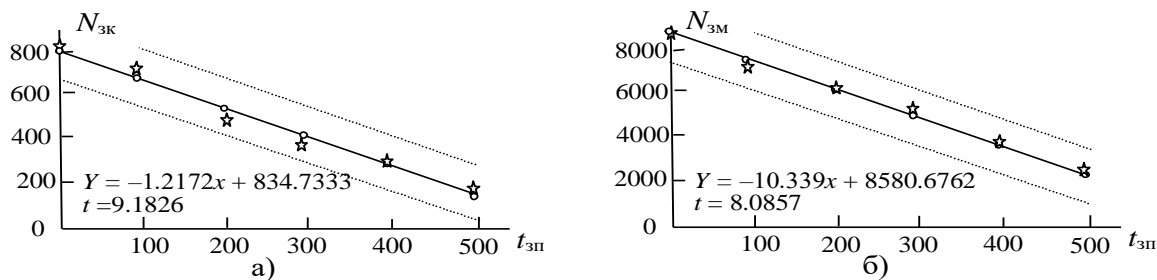


Рис. 3. Залежності зміни топології МР від величини зупинки вузлів

Для дослідження впливу п'яти основних незалежних факторів (швидкість вузлів  $v$ , величина часу зупинки вузлів  $t_3$ ,  $N$ ,  $\Gamma$ , метод маршрутизації) на мережеві параметри ( $S$ , середній обсяг службового трафіка  $V_{ст}$ , середня споживана потужність  $P$ ) використовуємо метод дисперсійного факторного аналізу [6], ґрунтуючись на припущеннях нормальності розподілів значень факторів і реакції, а також на збіжності значень дисперсії реакцій.

У табл. 1 представлені досліджувані фактори, кожний з яких оцінюємо двома значеннями: максимальним і мінімальним рівнем.

Складемо план експерименту [8]. Повний факторний експеримент складе  $2^5$  комбінацій рівнів. Кожен експеримент повторимо 4 рази. Результати експериментів представлені на рис. 4.

№ т.п.	Фактор	Нижній рівень (- 1)	Верхній рівень (+ 1)
1	Швидкість $v$ , м/с	5	25
2	Час зупинки $t_3$ , с	3	30
3	Розмір мережі $N$	20	50
4	Кількість джерел – $\Gamma$	10	50
5	Метод маршрутизації	зондовий	табличний

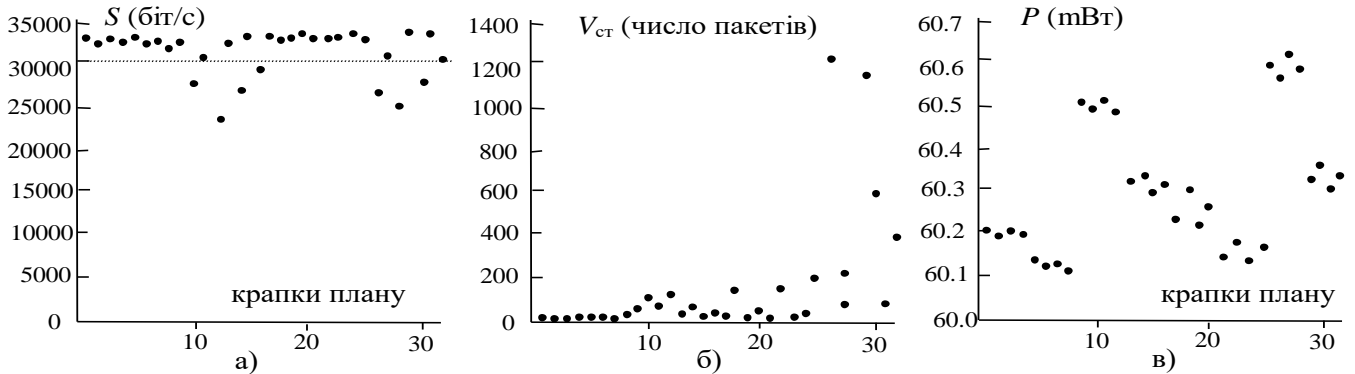


Рис. 4. Середні значення мережевих параметрів при повному факторному експерименті

Якісний аналіз дозволяє зробити висновок про значимий вплив на мережеві параметри факторів 1, 3, 4 і 5. Вплив фактора 2 незначний. Оцінимо кількісно вплив факторів на мережні параметри. Для цього на рис. 5 представимо головні ефекти, включаючи по парний вплив факторів, при 90 % довірчому інтервалі.

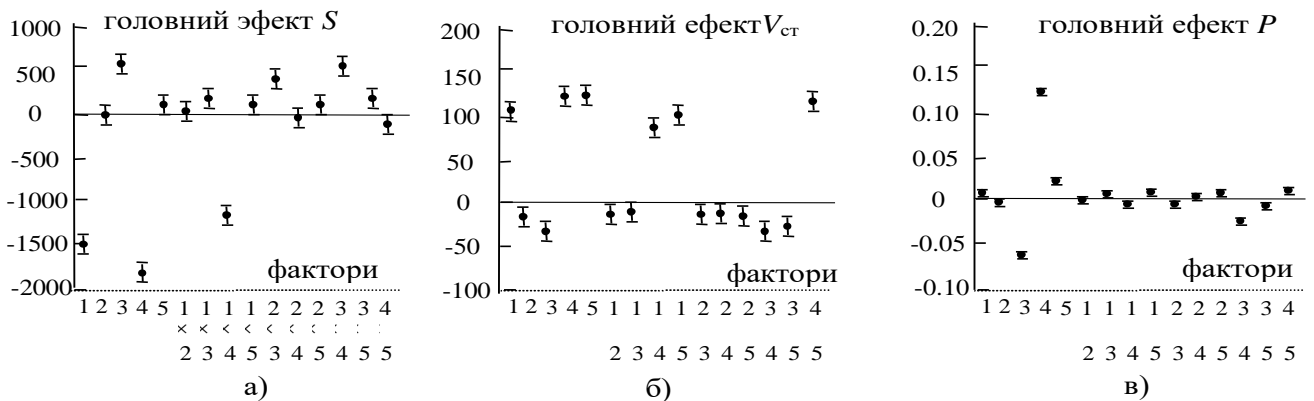


Рис. 5. Головні ефекти мережевих параметрів

Ефекти факторів 1 і 4 (їхній взаємний вплив) значно знижують пропускну здатність мережі (рис. 5а). Ефект 3-го фактора показує збільшення  $S$  при збільшенні розмірності мережі. Рис. 5б показує, що ефекти факторів 1, 4, 5 (а також їхній взаємний вплив  $1 \times 4$ ,  $1 \times 5$ ,  $4 \times 5$ ) збільшують обсяг службового трафіка (особливо при використанні табличного методу маршрутизації). На величину потужності, що витрачається, впливають два фактори: ефект 3-го фактора зменшує потужність, що витрачається, (збільшення  $N$  приводить до збільшення числа “коротких” маршрутів) і ефект фактора 4 збільшує  $P$  (рис. 5в).

Оцінка внеску кожного фактора в сумарну дисперсію показана в табл. 2. Помітимо, що ефект фактора 4 (кількість відправників) визначає 69 %, 20 % і 34 % дисперсії для  $P$ ,  $V_{ст}$  і  $S$ , відповідно. Наступними по значимості факторами є швидкість вузлів  $v$  і розмірність мережі  $N$ , а також значно взаємний вплив швидкості і вхідного навантаження ( $1 \times 4$ ). Отримані результати отримані на основі  $F$ -статистики з використанням програмного продукту MATLAB [8].

Таблиця 2

Фактор	$S$ (%)	$V_{ст}$ (%)	$P$ (%)	Фактор	$S$ (%)	$V_{ст}$ (%)	$P$ (%)
1	30.176	13.373	0.071	1×5	0.172	10.221	0.110
2	0.022	0.489	0.071	2×3	2.043	0.015	0.118
3	3.994	2.558	20.990	2×4	0.048	0.196	0.004
4	34.306	19.857	68.885	2×5	0.147	0.446	0.004
5	0.315	19.966	2.332	3×4	3.500	2.596	6.035
1×2	0.021	0.496	0.018	3×5	0.373	1.934	0.110
1×3	0.569	0.284	0.071	4×5	0.258	14.535	0.357
1×4	16.816	8.801	0.282	помилка	7.238	4.133	0.642

Для зменшення кількості іспитів проведемо частковий факторний експеримент із зміною факторів по одному [3]. Інтервали варіювання по кожному з факторів:  $\Delta v = 5$ ,  $\Delta g = 10$ ,  $\Delta N = 10$ . Для спрощення позначень і обробки експериментальних даних перейдемо до безрозмірної системи координат із початком у центрі досліджуваної області. Число прогонів  $N_{пр} = t^2_{\alpha} D_y / \varepsilon^2$  імітаційної моделі визначалося при точності моделювання 0,01 з вірогідністю 0,95 [8].

У результаті факторного аналізу можна зробити наступні висновки:

- більш ефективний зондовий метод маршрутизації досягає однакових характеристик з табличним методом при меншому обсязі службового трафіка;
- фактор 4 (обсяг вхідного навантаження) за впливом на мережеві параметри близький до впливу сукупності факторів 1 і 3 ( $v$  і  $N$ );
- збільшення  $N$  при незмінності  $\Gamma$  приводить до збільшення пропускної здатності, зменшенню обсягу службового трафіка і потужності, що витрачається;
- збільшення вхідного трафіка і збільшення числа пар відправник-адресат приводить до неоднакових результатів. Наприклад, збільшення пар відправник-адресат приведе до збільшення  $V_{ст}$ , а збільшення вхідного трафіка в одного вузла не приведе до зміни  $V_{ст}$ .

#### ЛІТЕРАТУРА

1. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
2. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63 – 65.
3. Міночкін А.І., Романюк В.А. Імітаційне моделювання методів маршрутизації, які застосовуються в автоматизованих мережах радіозв'язку // Збірник наукових праць № 1. – К.: КВІУЗ. – 2001. – С. 95 – 102.
4. Романюк В. А. Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв'язку з динамічною топологією // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2003. – С. 112 – 119.
5. Миночкин А.И., Романюк В.А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 1. – С. 31 – 36.
6. Camp T., Davies V., Boleng J. Mobility Models for Ad Hoc Simulation // Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC), 2002.
7. Колемаев В.А., Староверов В.Б., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.
8. Гульяев А.К. MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. – СПб: КОРОНА принт, 2001. – 400 с.