

# Методика синтезу автоматизованої системи оперативного планування зв'язку у низькоорбітальній космічній системі передачі повідомлень

## The Synthesis Method of Automated System of Operational Planning in Low-Space Communication System Messaging

Сергій Ковбасюк<sup>1</sup>, Віктор Бовсуновський<sup>1</sup>, Сергій Дупелич<sup>1</sup>, Андрій Куценко<sup>2</sup>  
Serhii Kovbasiuk, Viktor Bovsunovskiy, Serhii Dupelych, Andrii Kutsenko

<sup>1</sup> *Zhytomyr Military Institute named after S. P. Koroljov*  
22 Prospect Miru, Zhytomyr, 10004, Ukraine

<sup>2</sup> *Military unit A1686*  
33 Elektrykiv, Kyiv, 04176, Ukraine

DOI: [10.22178/pos.21-9](https://doi.org/10.22178/pos.21-9)

LCC Subject Category: [TL500-777](#)

Received 02.04.2017  
Accepted 28.04.2017  
Published online 30.04.2017

Corresponding Author:  
Viktor Bovsunovskiy,  
[vovctor@i.ua](mailto:vovctor@i.ua)

© 2017 The Authors. This article is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](#) 

**Анотація.** Однією з причин зниження оперативності зв'язку у низькоорбітальних космічних системах передачі повідомлень, які побудовані на базі наноплатформ, є високий ступінь централізації оперативного планування. Для подолання зазначеної проблеми розроблено методику яка здійснює розподіл завдань оперативного планування зв'язку, мінімізуючи обмін службовою інформацією між просторово-віддаленими вузлами, та враховує обчислювальну продуктивність програмно-апаратних засобів. Запропонована методика базується на використанні методів структурно-параметричного синтезу, імітаційного моделювання та статистичної обробки отриманих результатів. Її застосування дозволяє отримати оптимальну структуру автоматизованої системи оперативного планування зв'язку у низькоорбітальній космічній системі передачі повідомлень за результатами оцінювання оперативності зв'язку в умовах фіксованого інформаційного навантаження.

**Ключові слова:** низькоорбітальна космічна система; оперативне планування; автоматизована система.

**Abstract.** One of the reasons for the decrease of efficiency in low-speed communication systems, satellite communication, which are based on nanoplatform is a high degree of operational planning centralisation. To overcome this problem the method which carries out the distribution of tasks of communications operational planning minimizing the exchange of information between spatially remote sites, and takes into account the computing performance of software and hardware was developed. The technique is based on the use of methods of structural and parametric synthesis, simulation and statistical analysis of the results. Its use allows to obtain the optimal structure of the automated system of operational planning in low-space communication system messaging evaluation of efficiency in terms of fixed communication of information load.

**Keywords:** LEO space system; operational planning; automated system.

## Вступ

Низькоорбітальні космічні системи (НКС) передачі повідомлень є складним комплексом просторово-розподілених програмно-апаратних засобів планування, комутації та зв'язку, які забезпечують інформаційний обмін у глобальному масштабі в інтересах військових і цивільних споживачів [1, 2, 3]. Вибір класу космічних апаратів (КА) та структури орбітального угруповання для побудови НКС значною мірою залежить від кількості абонентів, їх концентрації та потрібної оперативності зв'язку. Зазначене визначає сукупний питомий рівень витрат на створення радіонапряму чи одиниці переданої інформації.

Впровадження наноплатформ для побудови КА дозволяє суттєво знизити вагу економічного фактора за рахунок мініатюризації бортового обладнання, впровадження новітніх технологій запуску та виведення космічних апаратів на задані орбіти. Проте це призводить до зниження пропускної здатності каналів супутникового зв'язку. Внаслідок цього, а також через складність прогнозування характеристик інформаційного навантаження та високий ступінь централізації оперативного планування у НКС супутникового зв'язку спостерігається суттєве зниження оперативності доставки повідомлень.

Підвищення оперативності зв'язку в такій системі потребує застосування автоматизованих систем (АС), розроблених на основі децентралізованих методів оперативного планування, та їх узгодження з обчислювальною продуктивністю програмно-апаратних засобів, що їх реалізують.

Проблемам синтезу автоматизованих систем оперативного планування приділяють значну увагу при проектуванні складних технічних систем, включаючи супутникові [4, 5, 6, 7].

У монографії [4] запропоновано методіку синтезу багаторівневої структурно-параметричної моделі автоматизованих систем супутникового зв'язку, в основу якої покладено графоаналітичний метод. Отримана модель автоматизованих систем придатна для оцінювання оперативності доставки повідомлень при заданих структурі, параметрах системи і рівномірному завантаженні супутникових каналів. Проте вона не враховує динаміки функціонування мережі передачі даних, що є критично важливим для систем су-

путникового зв'язку з обмеженою пропускною здатністю.

Для подолання зазначених вище недоліків широко застосовують методи стохастичного імітаційного моделювання [5, 6], які дозволяють отримати імовірно-часові характеристики оперативності доставки повідомлень для різних варіантів структур супутникової радіомережі та рівня інформаційного навантаження. Використання зазначених методів не передбачає синтезу структури АС, а дозволяє оцінити якість оперативного планування на рівні мережної та сеансної взаємодії.

Переваги і недоліки, які притаманні обом зазначеним підходам, обумовлюють необхідність розробки методіки, яка базується на застосуванні положень методології синтезу структури розподілених автоматизованих систем [7], і включає методи структурно-параметричного синтезу та імітаційного моделювання.

Тому *метою статті* є розробка методіки автоматизованих систем оперативного планування зв'язку у низькоорбітальних космічних системах передачі повідомлень.

## Результати дослідження

Відповідно до основних принципів системного підходу [4, 7] та особливостей побудови низькоорбітальних космічних систем передачі повідомлень структура розподіленої автоматизованої системи оперативного планування зв'язку  $Str$  матиме вигляд (1):

$$Str = (R, V, F, A, X, B), \quad (1)$$

де  $r = \overline{1, R}$  – порядковий номер ієрархічного рівня;

$V = \{V^r\}$  – множина вузлів зв'язку;

$F = \{F_\varphi\} = \{F_\psi\}$  – множина завдань (функцій);

$A = \{\alpha_{\varphi, \psi}\}$  – множина ліній зв'язку, які характеризують ступінь алгоритмічної взаємодії між парою функцій;

$X = \{X_\varphi\} = \{X_\psi\}$  – множина правил виконання завдань (функцій) та способів представлення інформації;

$B = \{b^r\}$  – обчислювальна продуктивність програмно-апаратних засобів вузлів зв'язку відповідного ієрархічного рівня.

Кількість ієрархічних рівнів  $R$  та їх черговість визначається з урахуванням масштабу

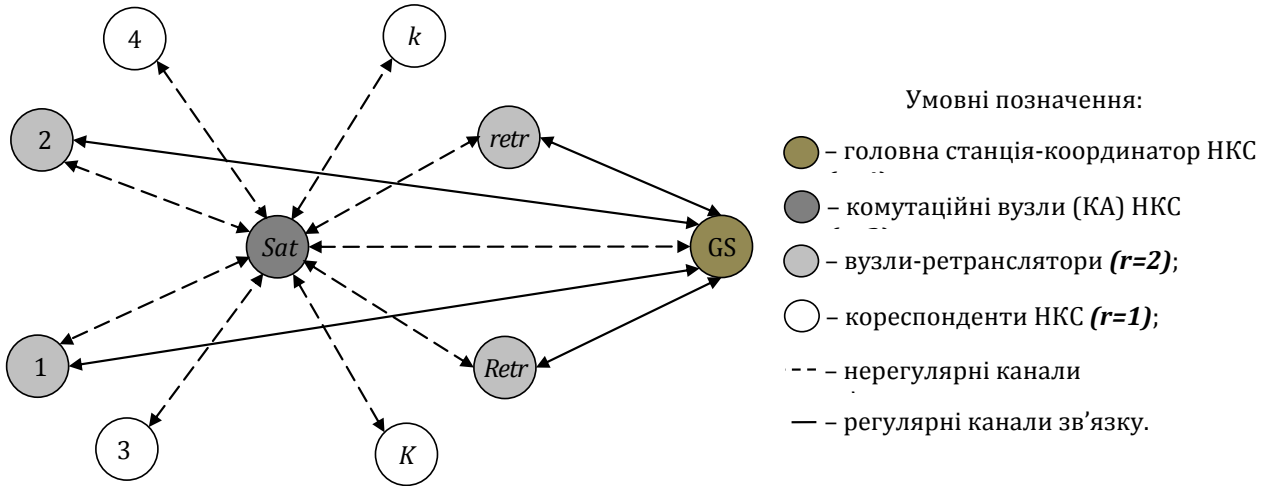


Рисунок 1 – Топологія низькоорбітальних космічних систем передачі повідомлень

Кількість вузлів зв'язку відповідних для кожного з ієрархічних рівнів  $N_{V^r}$  визначається:

$N_{V^4}$  – технологією управління угрупованням КА, що визначається кількістю пунктів прийому-передачі інформації та координації мережі;

$N_{V^2}, N_{V^3}$  – потрібною пропускною здатністю та оперативністю зв'язку у НКС передачі повідомлень;

$N_{V^1}$  – потребами споживачів інформації.

Зважаючи на те, що існуючі централізовані методи оперативного планування у НКС передачі повідомлень не здатні точно прогнозувати обстановку в просторово-віддалених вузлах, а децентралізовані способи володіють підвищеною складністю обчислювальних процедур, то існує необхідність проведення досліджень варіантів побудови розподіленої АС та її узгодження з обчислювальною продуктивністю програмно-апаратних засобів.

Для цього процес оперативного планування представлено у вигляді сукупності завдань

НКС передачі повідомлень, її топології та програмно-апаратних засобів, доступних для реалізації часткових завдань оперативного планування зв'язку (рис. 1): комутації, ретрансляції повідомлень та координації роботи учасників мережі.

$F^r$ , які виконуються визначеним способом  $X^r$  у вузлах відповідного ієрархічного рівня та пов'язані між собою лініями зв'язку (2)-(3):

$$Str = \left\{ F^r, X^r; A^r \right\} \left\{ \begin{array}{l} \beta^r \leq b^r; \\ R, V, B = const \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\beta^r : (F^r \times X^r), \quad (3)$$

де  $F^r, X^r$  – множина функцій та відповідних способів їх реалізації, які виконуються вузлом зв'язку відповідного ієрархічного рівня;

$A^r$  – алгоритмічна зв'язність завдань, які виконує вузол зв'язку відповідного ієрархічного рівня;

$\beta^r$  – відносний сукупний рівень завантаження обчислювального комплексу вузла зв'язку відповідного рівня ієрархії.

Значна кількість можливих варіантів структур АС та потреба проведення детального моделювання кожного з них обумовлює необхідність застосування додаткових мето-

дів, які дозволяють забезпечити синтез оптимального варіанта структури розподіленої АС оперативного планування зв'язку з урахуванням складності завдань, ступеня алгоритмічної взаємодії між ними та обчислювальної продуктивності програмно-апаратних засобів.

Поставлене у такому вигляді завдання доцільно вирішувати за допомогою графоаналітичних методів. Аналіз відомих підходів [4, 7] дає змогу запропонувати метод розрізання графу, який дозволяє забезпечити розподіл функцій в АС з урахуванням максимального ступеня алгоритмічного зв'язку, мінімізуючи обмін службовою інформацією між просторо-розподіленими вузлами.

Позначимо вершинами графу  $G$ , що описує структуру процесу оперативного планування зв'язку у НКС, сукупність завдань  $F$  та відповідних їм способів  $X$  реалізації, а дугами  $A$  – лінії зв'язку (4):

$$G = (F, X; A). \quad (4)$$

Для забезпечення децентралізації процесу оперативного планування зв'язку у НКС в умовах обмеженої обчислювальної продуктивності апаратних засобів необхідно почергово провести розподіл графу (4) для кожної з пар вузлів зв'язку сусідніх ієрархічних рівнів (рис. 1) відповідно до (5)-(6):

$$G \rightarrow G^r = (F^r, X^r; A^r) \left| \begin{array}{l} \beta^r \leq b^r; \\ F_\varphi \in F^r, X_\varphi \in X^r, \alpha_{\varphi, \psi} \in A^r \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\beta_\varphi : (F_\varphi \times X_\varphi); F_\varphi \in F^r, X_\varphi \in X^r, \quad (6)$$

де  $G^r$  – частка процесу оперативного планування, що виконується у вузлах зв'язку відповідного рівня ієрархії;

$\beta_\varphi$  – рівень обчислювальної складності  $F_\varphi$ -го завдання.

Для кожного з варіантів розподілу графу  $G^r$  існує нормована оцінка ступеня алгоритмічного зв'язку  $W(A^r)$ .

Враховуючи зазначене, оптимальний варіант розподілу графу буде визначатися максимальним значенням цільової функції у вигляді (7):

$$G^r \Leftrightarrow \arg \max_{G^r \in G} W(A^r) \left| \beta^r \leq b^r \quad (7)$$

Для зменшення складності оцінювання варіантів розподілу графу в умовах вагомої різниці обчислювальної продуктивності вузлів зв'язку різних ієрархічних рівнів  $b^r$  можливо скористатися еквівалентними значеннями їх параметрів (8):

$$\beta_\varphi = \frac{Z_\varphi}{Z^{em}}, \quad (8)$$

де  $Z_\varphi$  – кількість ресурсу (наприклад, оперативної пам'яті), необхідного для реалізації  $\varphi$ -ї операції;

$Z^{em}$  – обчислювальна продуктивність еталонного обчислювального комплексу.

Формування обмежень обчислювальної продуктивності вузлів зв'язку здійснюється на основі відношення ресурсу досліджуваного обчислювального комплексу до еталонного значення (9):

$$b^r = \frac{Z^r}{Z^{em}}, \quad (9)$$

де  $Z^r$  – обчислювальна продуктивність обчислювального комплексу вузла зв'язку відповідного рівня ієрархії.

Визначення алгоритмічного зв'язку функцій досліджуваного графу та формування матриці суміжності  $MS$  здійснюється за виразами, які подано нижче (10)-(11):

$$MS = |a_{\varphi,\psi}|, \tag{10}$$

при  $a_{\varphi,\psi} = 0$ ;  $a_{\varphi,\psi} = a_{\psi,\varphi}$ ,  $\varphi = \psi$ ,

$$a_{\varphi,\psi} = \frac{n(\varphi,\psi)}{n(\varphi,\psi) + n(\bar{\varphi},\psi)}, \text{ при } \varphi \neq \psi, \tag{11}$$

де  $n(\varphi,\psi)$  – кількість випадків появи функції  $\psi$  після  $\varphi$ ;

$n(\bar{\varphi},\psi)$  – кількість випадків появи функції  $\psi$  після відмінної від  $\varphi$ .

Вираз (11) відображає алгоритмічну зв'язність вершин графу (5) через відносну частоту появи функції  $\psi$  після функції  $\varphi$ . Дані, необхідні для проведення обчислень, можуть бути отримані як статистичним так і експертним шляхом за результатами проведення радіотехнічних випробувань чи експлуатації реальної системи.

Початок процедури розподілу функцій розпочинається з визначення комбінацій вершин, які володіють максимальним рівнем алгоритмічної взаємодії (12)-(13):

$$\{a_{\varphi}\} \rightarrow a_{\varphi}^i \left| \sum_{\psi=1}^{\Psi} a_{\varphi,\psi} = \max, \tag{12}$$

$$\{a_{\psi}\} \rightarrow a_{\psi}^i \left| \sum_{\varphi=1}^{\Psi} a_{\varphi,\psi} = \max, \tag{13}$$

де  $a_{\varphi}^i$  – рядок з максимальною сумою елементів;

$a_{\psi}^i$  – стовбець з максимальною сумою елементів;

$i$  – порядковий номер етапу ітерації.

Розрахунок обчислювальної складності завдань, які належить рядку  $a_{\varphi}^i$  і стовбцю  $a_{\psi}^i$ , що володіють максимальним рівнем алгоритмічної взаємодії здійснюють за поданим виразом (14):

$$\beta^r = \begin{cases} \beta_{\varphi} + \beta_{\psi}, & i = 1 \\ \beta^r + \beta_{\psi}, & i > 1 \end{cases} \tag{14}$$

З урахуванням отриманих у виразах (12)–(14) результатів приймається рішення щодо доцільності включення вершини  $F_{\psi}$ ,  $X_{\psi}$  та дуги

$\alpha_{\varphi\psi}^i$  до підграфу  $G_i^r$  або завершення його формування (15)–(16).

$$G_i^r = \begin{cases} (F_{i-1}^r \cup F_{\psi}, X_{i-1}^r \cup X_{\psi}; A_{i-1}^r \cup \alpha_{\varphi\psi}^i); & \text{якщо } \beta^r \leq b^r \\ (F_{i-1}^r, X_{i-1}^r; A_{i-1}^r); & \text{якщо } \beta^r > b^r \end{cases} \tag{15}$$

$$\alpha_{\varphi\psi}^i = \alpha_{\varphi}^i \cup \alpha_{\psi}^i, \varphi \neq \psi. \tag{16}$$

У разі виконання вимоги  $\beta^r > b^r$  формування підграфу  $G_i^r$  завершується, а всі вершини, які йому не належать  $\forall (F^r, X^r) \notin G^r$ , використовують для побудови підграфу взаємодіючого вузла зв'язку  $G^{r+1}$  шляхом виконання необхідної кількості ітерацій (12)–(16).

Використання процедури розрізання графу здійснюється до остаточного завершення розподілу завдань між вузлами зв'язку усіх ієрархічних рівнів, забезпечуючи формування раціонального варіанту структури розподіленої АС оперативного планування зв'язку при фіксованій кількості ієрархічних рівнів, вузлів зв'язку та їх обчислювальній продуктивності.

Застосування зазначеної вище процедури при дослідженні нових методів оперативного планування зв'язку у НКС, зміні кількості ієрархічних рівнів, вузлів зв'язку або їх обчислювальної продуктивності дозволяє отримати сукупність  $q = \overline{1, Q}$  раціональних варіантів структур АС оперативного планування  $Str = \{Str^q\}$ .

В умовах фіксованого інформаційного навантаження  $\Lambda = const$  кожному з наведених вище варіантів структур АС можна поставити у відповідність нормований показник оперативності зв'язку у НКС  $W_{Str^q}^{On}$ . З урахуванням зазначеного, можна отримати відповідну множину оцінок у вигляді матриці нормованих показників оперативності зв'язку (17):

$$W^{On} = \left| W_{Str^q}^{On} \right|. \quad (17)$$

Пошук оптимального варіанту структури АС оперативного планування зв'язку у НКС полягає у виборі такого варіанту  $Str^{q*}$ , який забезпечить максимальне значення нормованого показника оперативності зв'язку в умовах фіксованого інформаційного навантаження (18)–(19):

$$Str^{q*} \Leftrightarrow \arg \max_{Str^q \in Str^q} W_{Str^q}^{On} \mid \Lambda = const, \quad (18)$$

$$Str^q = (F_q^r, X_q^r; A_q^r) \beta_q^r \leq b_q^r, \quad (19)$$

при  $\beta_q^r : (F_q^r \times X_q^r)$

Визначення нормованих показників оперативності зв'язку здійснюється за допомогою імітаційної моделі НКС передачі повідомлень (рис. 2).

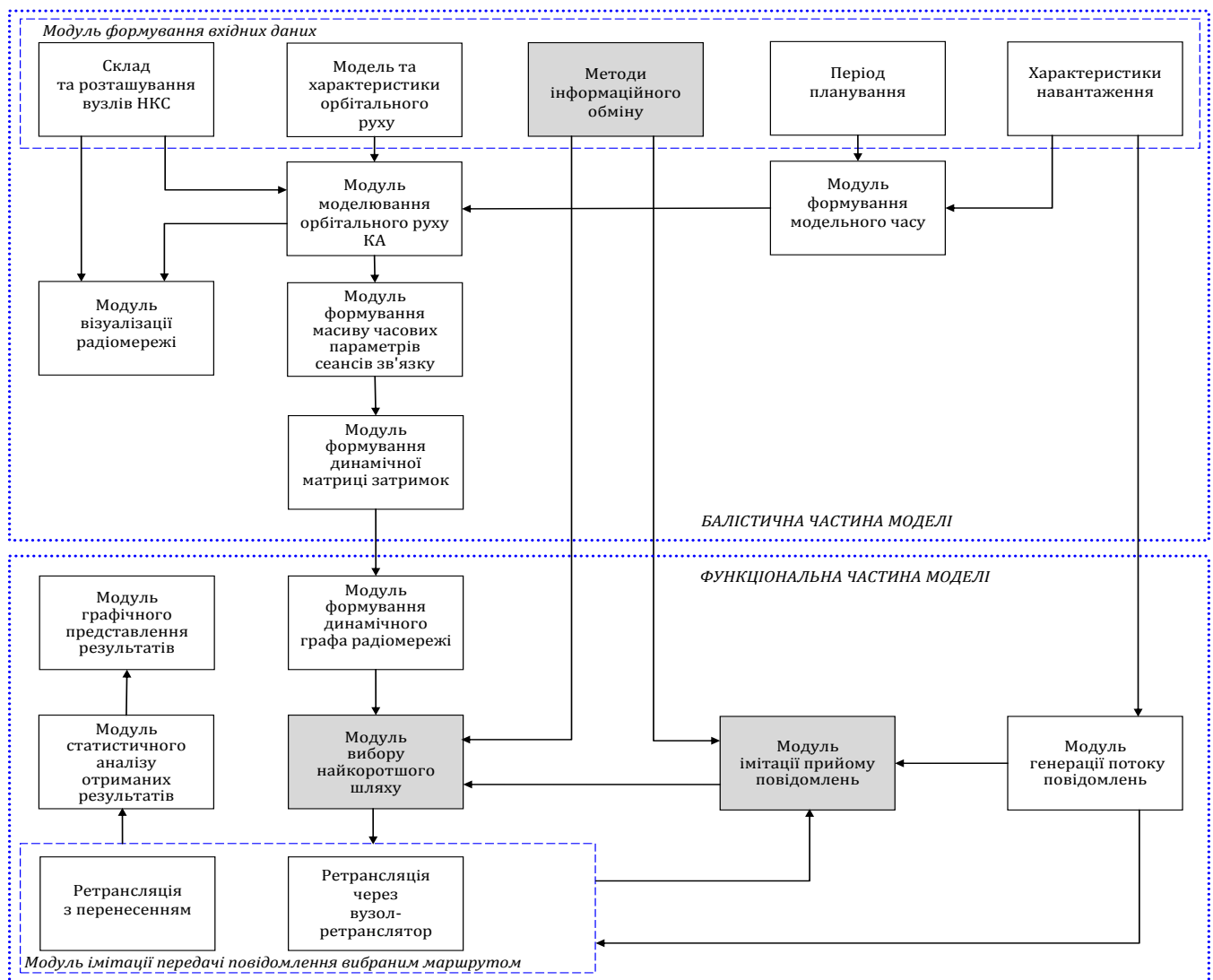


Рисунок 2 – Структурна схема імітаційної моделі низькоорбітальної космічної системи передачі повідомлень [6]



Обчислення нормованих показників оперативності зв'язку  $W_{Str^q}^{On}$  здійснюється за результатами імітаційного моделювання з урахуванням терміновості повідомлень (20):

$$W_{Str^q}^{On} = \sum_{s=1}^S (C^s \cdot \bar{W}(T_{Str^q}^s < T_{\partial on}^s)), \quad (20)$$

де  $C^s$  – нормоване значення коефіцієнта важливості повідомлення;  
 $\bar{W}(T_{Str^q}^s < T_{\partial on}^s)$  – імовірність доставки повідомлення адресату за час  $T_{Str^q}^s$ , що не перевищує допустимий  $T_{\partial on}^s$  [7, 8].

Коефіцієнт важливості повідомлень  $C^s$  може бути обчислений шляхом експертного оцінювання, наприклад, методом парних порівнянь [8]. Остаточний вибір методу обчислення залежить від закономірностей втрати цінності змісту інформації у повідомлення відповідної категорії терміновості.

Визначення імовірнісно-часових характеристик доставки повідомлень для кожного варіанту структури АС базується на проведенні такої кількості реалізацій імітаційного моделювання, яке повинно забезпечувати необхідну достовірність отриманих результатів.

Кожна окрема реалізація полягає в імітації процесу передачі повідомлення у НКС, яка використовує АС оперативного планування

відповідної структури, з метою отримання часових показників доставки повідомлень (21):

$$T_{Str^q}^s = \sum_{j,l,k} (T_{Oq(j,k)}^s + T_{npq(k,l)}^s), \quad j \neq l \neq k, \quad (21)$$

де  $j = \overline{1, J}$  – вузол-джерело повідомлень;  
 $l = \overline{1, L}$  – вузол-адресат повідомлень;  
 $k = \overline{1, K}$  – вузол-комутатор (ретранслятор);  
 $T_{Oq(j,k)}^s$  – тривалість очікування появи каналу зв'язку;  
 $T_{npq(k,l)}^s$  – тривалість передачі повідомлення каналом зв'язку.

Для забезпечення потрібного ступеня довіри до результатів моделювання процесу доставки повідомлень у НКС застосовано метод статистичних випробувань. Використання зазначеного методу дає можливість отримання адекватних характеристик середнього часу доставки повідомлень  $T_{Str^q}^s$  (рис. 3) та дисперсії в умовах великої кількості взаємодіючих випадкових факторів за рахунок проведення необхідної кількості реалізацій моделювання.

На основі проведених випробувань побудовано діаграми та графіки розподілу часу доставки повідомлень у НКС, з відповідною структурою АС оперативного планування (рис. 4).

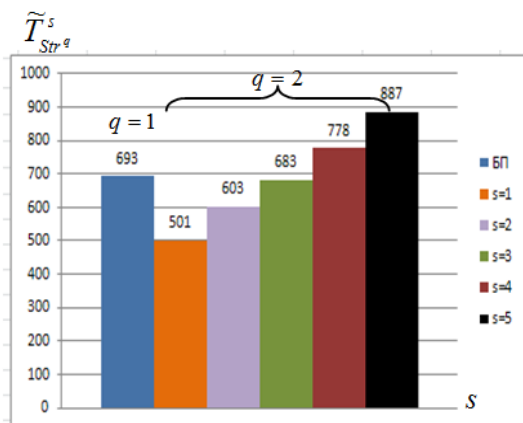


Рисунок 3 – Середній час доставки повідомлень у низькоорбітальній космічній системі

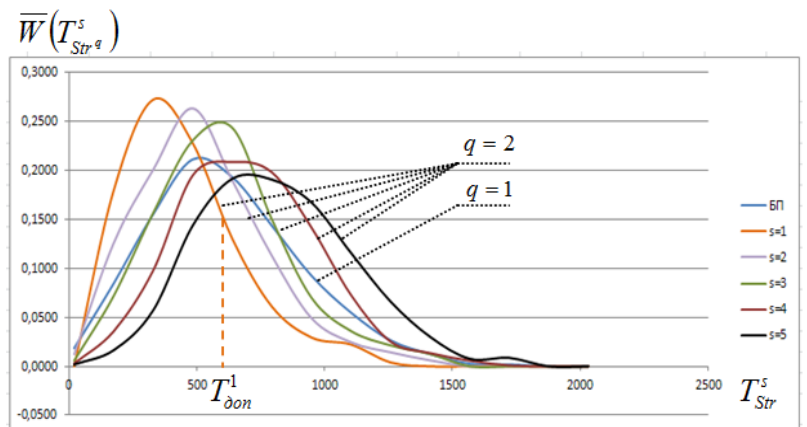


Рисунок 4 – Розподіл часу доставки повідомлень у низькоорбітальній космічній системі

Значення імовірності  $\overline{W}(T_{Stt^a}^s < T_{don}^s)$  визначається інтегральним способом з урахуванням нормативного часу доставки повідомлень  $T_{don}^s$  різних категорій терміновості.

Таким чином, методика синтезу АС оперативного планування зв'язку у НКС передачі повідомлень передбачає:

Визначення раціональної кількості варіантів структур АС оперативного планування зв'язку у НКС передачі повідомлень шляхом ітеративного застосування методу розрізання графу за виразами (2)–(16).

Проведення імітаційного моделювання визначених варіантів структур АС при фіксованому інформаційному навантаженні (рис. 2) з урахуванням особливостей орбітального руху, мережної та сеансної взаємодії за формулою (21).

Обробку результатів моделювання методом статистичних випробувань за виразом (20).

Вибір оптимального варіанту автоматизованої системи оперативного планування зв'язку у НКС передачі повідомлень за визначеним критерієм (18) і (19).

## Висновки

Застосування запропонованої методики дозволяє отримати оптимальну структуру ав-

томатизованої системи оперативного планування зв'язку у низькоорбітальній космічній системі передачі повідомлень за результатами оцінювання оперативності зв'язку в умовах фіксованого інформаційного навантаження.

Наукова новизна даної методики полягає у поєднанні методів синтезу розподілених інформаційних систем та імітаційного моделювання для вирішення завдання синтезу автоматизованої системи оперативного планування зв'язку у низькоорбітальній космічній системі, що дозволяє забезпечити максимальну оперативність зв'язку за умов забезпечення заданого рівня завантаження обчислювального комплексу вузла зв'язку відповідного рівня ієрархії.

Практична цінність даної роботи полягає у можливості використання даної методики для визначення оптимальної структури автоматизованої системи оперативного планування зв'язку на етапі проектування або в процесі її удосконалення.

Основні напрямки подальших досліджень пов'язані з дослідженням методів визначення оптимальної структури автоматизованої системи оперативного планування зв'язку у низькоорбітальній космічній системі передачі повідомлень, яка функціонує в умовах динамічної зміни інформаційного навантаження.

## Список використаних джерел / References

1. Kuzovnikov, A. V., Ivanova, M. P., & Agureev V. A. (2015). *Predlozheniya po postroeniyu perspektivnoy sistemyi personalnoy sputnikovoy svyazi* [Variants of perspective personal satellite communications system architecture]. *Issledovaniya naukoграда*, 3(13), 4–10 (in Russian)  
[Кузовников, А. В., Иванова, М. П., & Агуреев В. А. (2015). Предложения по построению перспективной системы персональной спутниковой связи. *Исследования наукограда*, 3(13), 4–10].
2. Taylor, T. (2013, August 14). *Low-Cost Tactical Space Capabilities*. Retrieved from <http://smdsymposium.org/wp-content/uploads/2013/09/Travis-Taylor-Presentation.pdf>
3. Sokolov, K. O., Gudima, O. P., & Shiyatiy, O. B. (2015). *Propozytsiyi shchodo zabezpechennya Zbroynykh Syl Ukrayiny sputnykovym zvyazkom* [Proposals to provide the Armed Forces of Ukraine with satellite communication]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, 2, 14–17 (in Ukrainian)  
[Соколов, К. О., Гудима, О. П., & Шиятий, О. Б. (2015). Пропозиції щодо забезпечення Збройних Сил України супутниковим зв'язком. *Озброєння та військова техніка*, 2, 14–17].
4. Abolits, A. I. (2004). *Sistemyi sputnikovoy svyazi. Osnovyi strukturno-parametricheskoy teorii i effektivnost dlya perevoda* [Systems of satellite communication. Fundamentals of Structural-Parametric Theory and Efficiency]. Moscow: ITIS (in Russian)



- [Аболиц, А. И. (2004). Системы спутниковой связи. Основы структурно- параметрической теории и эффективность. Москва: ИТИС].
5. Kamnev, V. E., Cherkasov, V. V., & Chechin, G. V. (2010). *Sputnikovyie seti svyazi* [Satellite communication networks] (2nd ed.). Moscow: Voennyiy Parad (in Russian)  
[Камнев, В. Е., Черкасов, В. В., & Чечин, Г. В. (2010). Спутниковые сети связи (2-е изд.). Москва: Военный Парад].
6. Maltsev, G. N., & Motorin, N. M. (2007). *Programmno-modeliruyuschiy kompleks rascheta veroyatnostno-vremennyih harakteristik informatsionnogo obmena v seti malogabaritnyih sputnikov-retranslyatorov* [Software Module for Information Exchange Probability-timing Features Definition in Net of Small-dimensioned Satellite-relay]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 6, 18–23 (in Russian)  
[Мальцев, Г. Н., & Моторин, Н. М. (2007). Программно-моделирующий комплекс расчета вероятностно-временных характеристик информационного обмена в сети малогабаритных спутников-ретрансляторов. *Известия вузов. Приборостроение*, 6, 18–23].
7. Tarasov, V. A., Gerasimov, B. M., Levin, I. A., & Korneychuk, V. A. (2007). *Intellektualnyie sistemyi podderzhki prinyatiya resheniy: Teoriya, sintez, effektivnost* [Intellectual decision support systems: Theory, synthesis, efficiency]. Kiev: MAKNS (in Russian)  
[Тарасов, В. А., Герасимов, Б. М., Левин, И. А., & Корнейчук, В. А. (2007). *Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: Теория, синтез, эффективность*. Киев: МАКНС].
8. Akimov, A., Shevchuk, D., & Danilov D. (2015). *Operativnost peredachi informatsii v nizkoorbitalnoy sisteme svyazi s perenosom soobscheniy na bortu kosmicheskikh apparatov. Chast 1* [Latency of data transmission in LEO constellation with physical transfer of the message on board of a spacecraft. Part 1]. *Tehnologii i sredstva svyazi*, 1, 69–72 (in Russian)  
[Акимов, А., Шевчук, Д., & Данилов Д. (2015). Оперативность передачи информации в низкоорбитальной системе связи с переносом сообщений на борту космических аппаратов. Часть 1. *Технологии и средства связи*, 1, 69–72].