

**В.В. Ожінський, інж.**  
*Національний Центр управління та випробувань космічних засобів,  
Центр управління польотами КА, м. Євпаторія*  
**В.Г. Парфенюк, к.т.н., доц.**  
*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова  
Національного авіаційного університету*

## ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ БОРТОВИХ СИСТЕМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КООРДИНАТНИХ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ

*Розглянуто підходи до вирішення завдань планування роботи бортових систем космічних апаратів (КА) спостереження за Землею при використанні координатних методів управління бортовими та наземними засобами. Запропоновано нові способи функціонування бортового комплексу управління в автономному польоті.*

**Вступ.** Планування роботи бортових систем КА (далі планування) – багатоекстремальне, слабо структуроване завдання високої обчислювальної складності, що зростає зі збільшенням числа користувачів цільової інформації КА, ускладненням бортових систем, покращенням характеристик апаратури бортового спеціального комплексу (БСК). В перспективних КА планується використання координатних методів управління, що вимагає розробки нових підходів до процесу планування – вирішення проблеми раціонального розподілу обмежених ресурсів космічної системи (КС) між багатьма споживачами інформації. Стандартизація космічних платформ дозволяє, тією чи іншою мірою, уніфікувати підходи та методи, що використовуються при плануванні. Для вирішення проблеми підвищення автономності функціонування КА, перспективними, однак досить мало дослідженими вітчизняною наукою, є методи автоматичного планування роботи бортових систем космічного апарату.

**Аналіз основних досліджень та публікацій.** Традиційно процес планування як бортової апаратури, так і наземних засобів КС поділяють на два етапи [1]:

– довгострокове планування, яке включає програму функціонування космічної системи та визначає загальну мету та часткові задачі, що мають бути досягнуті в результаті запуску, а також план роботи з КА системи на тривалий період;

– оперативне планування, результатом якого є добова програма роботи з КА, що відповідає тривалості технологічного циклу управління та конкретизує поточний етап виконання плану більш високого рівня з урахуванням успішності виконання програми польоту та стану бортових і наземних засобів [2].

Питання, пов'язані з оптимізацією планування роботи бортових систем КА, досить детально розглянуто в роботах [1, 2, 4]. Однак у даних роботах розглянуто підходи до планування, по-перше: при використанні програмно-часового методу управління, при якому автономність функціонування КА досить низька; по-друге: оптимізація планування розглядається як раціональне формування плану проведення операцій вмикання–вимикання бортової апаратури. Передбачається, що при зміні методу управління КА на координатний (координатно-програмний чи координатно-часовий), та правильному виборі математичного апарату процесу оперативного планування, з'явиться можливість досягнення значно кращих показників ефективності функціонування КС.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо процес планування при використанні координатно-часового методу управління, як найбільш універсального, що поєднує переваги програмно-часового та координатно-програмного методу. Спрощено функціонування бортової апаратури на основі обраного методу можна пояснити структурною схемою (рис. 1).

При використанні координатно-часового методу планування роботи бортових систем КА здійснюється в координатах «час–положення в просторі–подія». При цьому функціонування в черговому режимі здійснюється з використанням програмних команд, що виконуються за часом, вмикання ж спеціальної апаратури здійснюється при відповідності поточних координат КА, що формуються апаратурою супутникової навігації з заданими в програмі польоту.

Користувачі інформації формують заявки на отримання цільової інформації, що найчастіше включають:

- географічні координати району зйомки;
- час на реалізацію заявки;
- конфігурацію пристроїв та режими їх роботи;
- вимоги до якості необхідної інформації (роздільна здатність, хмарність, відсоток покриття заявленого району).

В існуючих та перспективних підсистемах планування роботи БСК передбачено, що при обробці заявок користувачів інформації як критерій прийняття в обробку використовується числове значення пріоритету, яке не змінюється на протязі їх реалізації. Оператор підсистеми планування роботи БСК має можливість не брати в обробку заявки, що за прогнозом не відповідають певним критеріям (відсотку хмарності, розрізняльній здатності, кута місця Сонця та ін.).

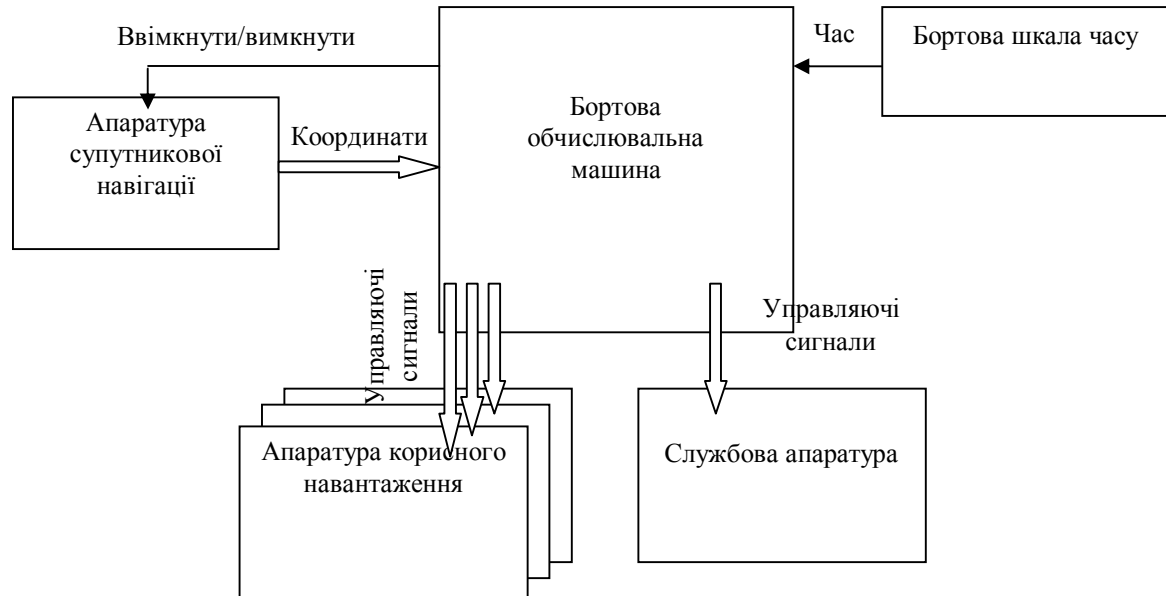


Рис. 1. Структурна схема функціонування бортової апаратури КА при координатно-часовому методі управління

Основною відмінністю запропонованого підходу є те, що оптимізація плану роботи бортових систем КА здійснюється бортовим комплексом управління (БКУ), а засоби наземного комплексу управління (НКУ) задіяні лише на підготовчому етапі планування. Таким чином, відбувається перерозподіл функцій між НКУ і БКУ, і, як наслідок, підвищується автономність функціонування КА.

Порядок операцій підготовчого етапу буде таким. На основі заявок користувачів інформації та розрахованої стандартної балістичної інформації проводиться вибір із усієї множини заявлених районів підмножини заявок, що можуть бути реалізованими в період планування. Першим кроком, що вимагає значних обчислювальних витрат є розрахунок «плану можливих реалізацій» – знаходження КА над заданим районом, поле зору сканера повністю, або частково «накриває» район зйомки і є принципова можливість його спостереження (рис. 2).

Подальша робота з перспективним планом передбачає виключення з плану витків, що не задовольняють вимогам заявок користувачів – критеріям придатності. Критерії придатності не є функціоналом, їх значення бінарні і можуть приймати одне з двох значень: «1 – вимоги виконуються», «0 – вимоги не виконуються»:

– вимоги по сумісності:

$$Com = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \varphi_i \leq \varphi_{дон}; \\ 0, \text{ якщо } \varphi_i > \varphi_{дон}; \end{cases}$$

– вимоги по освітленості:

$$L = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \varphi_i \geq \varphi_{ай}; \\ 0, \text{ якщо } \varphi_i < \varphi_{ай}; \end{cases}$$

де  $\varphi_i$  – розрахунковий кут місця Сонця в районі зйомки;  $\varphi_{дон}$  – заявлений (допустимий) кут місця Сонця;

– вимоги по розрізняльній здатності (кута відхилення):

$$R = \begin{cases} 1, \text{ якщо } r_i \leq r_{ай}; \\ 0, \text{ якщо } r_i > r_{ай}. \end{cases}$$

де  $r_i$  – розрізняльна здатність на витку геометричної видимості району;  $r_{дон}$  – допустима (заявлена) розрізняльна здатність;

– при плануванні заявок іноді корисним може бути також допустимий відсоток покриття району зйомки:

$$S = \begin{cases} 1, \text{ якщо } k_i \geq k_{\text{доп}}; \\ 0, \text{ якщо } k_i < k_{\text{доп}}, \end{cases}$$

де  $k_i = \frac{S_i}{S_0}$  – коефіцієнт, який характеризує відношення площі району зйомки  $S_i$ , що попадає в смугу

огляду бортової апаратури КА до загальної площі району  $S_0$ ;  $k_{\text{доп}}$  – допустимий коефіцієнт;  
– вимоги по відсотку хмарності над районом зйомки:

$$W = \begin{cases} 1, \text{ якщо } b_i \leq b_{\text{доп}}; \\ 0, \text{ якщо } b_i > b_{\text{доп}}, \end{cases}$$

де  $b_i$  і  $b_{\text{доп}}$  – прогнозований із заданою ймовірністю відсоток хмарності над районом зйомки. Результатом стає перелік районів можливої зйомки.

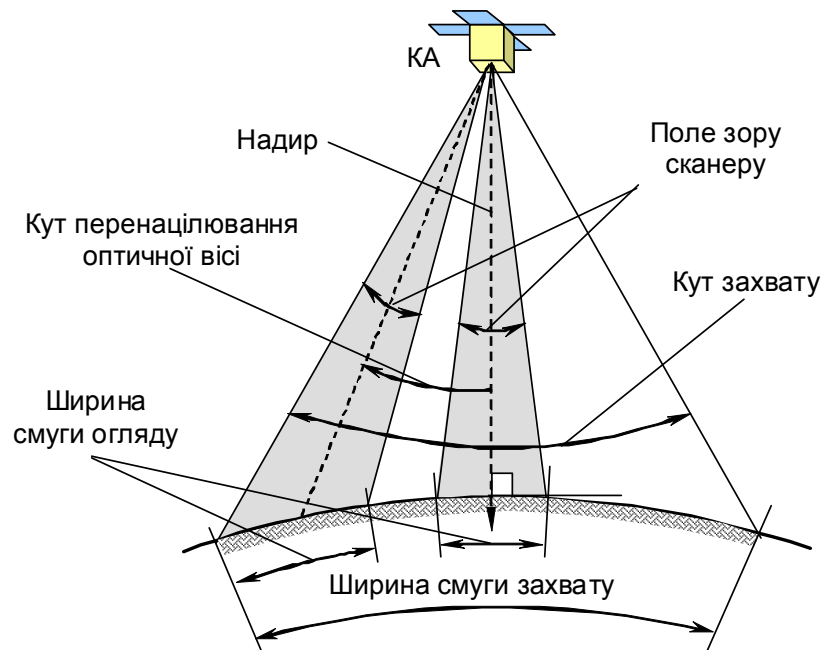


Рис. 2. Смуга огляду КА спостереження

На відміну від класичної схеми, оператор-планувальник не приймає рішення на включення в план того чи іншого району, а лише готує можливий план роботи корисного навантаження до закладення на борт КА.

У теорії прийняття рішень відомо декілька основних схем оптимізації векторних задач і відповідних їм принципів компромісів. Серед них широко використовуються такі принципи: рівномірності в різних модифікаціях; абсолютної та відносної справедливої уступки; послідовної уступки та принцип виділення головного критерію.

Аналіз постановки завдання планування показує, що її можливо розділити на декілька окремих частин і, відповідно, використовувати декілька схем компромісів:

– по-перше, при плануванні роботи БСК, з одного боку, необхідно обов’язково виконати екстренні замовлення, і в цьому разі максимізується лише один показник, а решта не повинна перебільшувати визначеної межі. У цих умовах доцільно користуватись принципом виділення головного критерію. При виконанні планових замовлень спостерігається протиріччя: для збільшення обсягу корисної інформації необхідні додаткові витрати ресурсу апаратури БСК;

– по-друге, при плануванні роботи бортового забезпечувального комплексу (БЗК) необхідно виконати усі необхідні операції з найменшим використанням ресурсів КА;

– по-третє, при нештатних ситуаціях на борту КА головним стає питання аналізу стану КА та причин, що викликали нештатну ситуацію, відновлення працездатності КА, передача телеметричної інформації до НКУ.

Описана у [1] методика оптимізації використовує нелінійну схему компромісів [12]. Її особливість полягає в тому, що задача вибору схеми компромісів замінюється задачею синтезу деякої скалярної згортки часткових критеріїв. Недоліком даного підходу є те, що він є спрощеним, має невеликий набір

критеріїв оптимізації та стосується лише визначення оптимального плану проведення зйомок і не враховує автономного функціонування КА.

В загальному така згортка описується виразом (1):

$$Y[\alpha, y(x)] = \sum_{i=1}^n \alpha_i [1 - y_{0i}(x)]^{-1}, \quad (1)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнти, що визначаються методом експертних оцінювань заявником та розробником космічної системи спостереження, визначають переваги кожного з критеріїв;  $y_{0i}$  – часткові критерії оптимальності.

Тому при плануванні роботи корисного навантаження введемо поняття функції корисності району зйомки  $Y_{\hat{e}i}$ , частковими критеріями оптимальності стануть:

$y_1(x)$  – часткова функція категорії даних, значення якої залежить від завдань зйомок, наприклад, глобальне картографування, регіональний моніторинг, локальне спостереження тощо;

$y_2(x)$  – часткова функція категорії користувача, значення якої залежить від приналежності користувача до різних організацій (Міністерство з надзвичайних ситуацій, Міністерство оборони, Міністерство аграрної політики, приватні замовники);

$y_3(x)$  – часткова функція хмарності;

$y_4(x)$  – часткова функція екстреності, що дозволяє однозначно розставляти пріоритет між декількома екстремими заявками, враховуючи значення інших функцій;

$y_5(x)$  – часткова функція, що характеризує необхідність проведення програмних відворотів КА, зворотно пропорційна величині кута відвороту;

$y_6(x)$  – часткова функція освітленості;

$y_7(x)$  – часткова функція відсотка реалізації, що характеризується відношенням знятого/не знятого району;

$y_8(x)$  – функція, що характеризує «вік» заявки (час простою в заявці на обслуговування);

$y_9(x)$  – функція, що характеризує пріоритетність режимів роботи апаратури (більше значення для пристроїв із більшою розрізнявальною здатністю апаратури тощо) та ін.

Для практичного використання потрібно навести всі критерії до єдиного способу оптимізації. Тоді скалярна згортка часткових критеріїв для кожного району зйомки згідно з [4], набуде вигляду:

$$Y_{\hat{e}i}(x) = \alpha_1 \cdot \frac{1}{1 - y_{1n}} + \alpha_2 \cdot \frac{1}{1 - y_{2n}} + \dots + \alpha_9 \cdot \frac{1}{1 - y_{9n}}; \quad \sum_{i=1}^9 \alpha_i = 1,$$

де  $y_{1n}, \dots, y_{9n}$  – нормовані значення часткових функцій корисності.

Фундаментальна різниця вибору згортки за нелінійною схемою від інших відомих згорток в органічному зв'язку із ситуацією прийняття багатокритеріального рішення [4]. Такий вибір надає можливість чітко, безпомилково і точно встановити важливість кожного району зйомки та не допускає помилкової інтерпретації операторами.

Результатом розрахунків є можливий план функціонування БСК як множини режимів функціонування корисного навантаження КА:

$$\hat{Z}_{\hat{e}i} = \{ \{ M_{\hat{i}\hat{A}} \}, \{ H_{\hat{e}i\hat{d}\hat{a}} \}, \{ m_{\hat{e}i} \}, \{ ch_{\hat{n}\hat{e}} \}, \{ A_{\hat{i}\hat{d}} \}, \{ W_{\hat{c}} \}, \{ Y_{\hat{e}i\hat{d}} \}, \{ I_{\hat{A}} \}, \{ N_{\hat{A}} \} \},$$

де  $\{ M_{\hat{i}\hat{A}} \}$  – множина масивів програмних відворотів для кожної зйомки у вигляді:

$$\{ M_{\hat{i}\hat{A}} \} = \{ \{ t_i, t_e \} \} \{ Q_i \},$$

у якій  $\{ t_i, t_e \}$  – множина моментів (часів) початку  $t_i$  та кінця  $t_e$  високоточної орієнтації на райони зйомки;  $\{ Q_i \}$  – множина кватерніонів орієнтації для переходу від чергових режимів КА до високоточної орієнтації на райони зйомок, пункти прийому цільової інформації, що розраховуються таким чином:

$$Q_i = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ - \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) * \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) * \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \end{bmatrix},$$

де  $\vartheta$  – кут тангажу,  $\varphi$  – кут крену,  $\psi$  – кут рискання. Приклад відвороту в позитивному напрямку від орбітальної системи координат (ОСК) зображений на рисунку 3. Початок ОСК співпадає з центром мас КА, вісь  $OcZO$  направлена по радіус-вектору, що з’єднує центр мас Землі з центром мас КА, вісь  $OcXo$  лежить в площині орбіти КА та спрямована в бік орбітального польоту КА, вісь  $OcYo$  доповнює систему координат до правої.

$\{H_{\tilde{e}\tilde{i}\tilde{o}\tilde{a}}\}$  – множина координат початку та кінця проведення зйомок на інтервалі планування  $X, Y, Z$  в Гринвіцькій системі координат:

$$\{H_{\tilde{e}\tilde{i}\tilde{o}\tilde{a}}\} = \{\{X_{i^s}\}, \{Y_{i^s}\}, \{Z_{i^s}\}, \{X_{e^s}\}, \{Y_{e^s}\}, \{Z_{e^s}\}\},$$

де  $\{m_{ei}\}$  – режими функціонування БСК: безпосередня передача; запис інформації; стиснення інформації; відновлення інформації;  $\{ch_{\tilde{n}\tilde{e}}\}$  – множина спектральних каналів сканера;  $\{A_{i\delta}\}$  – множина уставок для апаратури корисного навантаження: коефіцієнти підсилення; коефіцієнти стиснення; настроювання системи компенсації та корекції помилок;  $\{W_C\}$  – множина визначених у кожній заявці допустимих відсотків хмарності;  $\{I_{\tilde{A}}\}$  – множина об’ємів використаних інформаційних ресурсів для кожної зйомки;  $\{Y_{\tilde{e}\tilde{i}\tilde{o}}\}$  – множина значень функцій корисності (пріоритетів), обрахованих для кожної зйомки;  $\{N_{\tilde{A}}\}$  – множина значень необхідних для кожної зйомки електроенергетичних ресурсів.

До плану можливого функціонування апаратури корисного навантаження додається план можливих операцій управління бортової забезпечувальної апаратури:

$$\hat{Z}_C = \{\{H_{C\tilde{A}}\}, \{m_{C\tilde{A}}\}, \{A_{C\tilde{A}}\}, \{N_{C\tilde{A}}\}, \{M_{iD}\}, \{K_{\tilde{A}0}\}\},$$

де  $\{H_{C\tilde{A}}\}$  – множина координат/часу вмикання/вимикання забезпечувальної апаратури;  $\{m_{C\tilde{A}}\}$  – множина режимів роботи забезпечувальної апаратури;  $\{A_{C\tilde{A}}\}$  – множина уставок для настроювання роботи забезпечувальної апаратури;  $\{N_{C\tilde{A}}\}$  – множина значень для системи енергозабезпечення;  $\{M_{iD}\}$  – множина необхідних корекцій бортового програмного забезпечення, закладення таких масивів проводиться не в кожному сеансі зв’язку, а за необхідністю;  $\{K_{\tilde{A}0}\}$  – множина початкових умов руху КА.

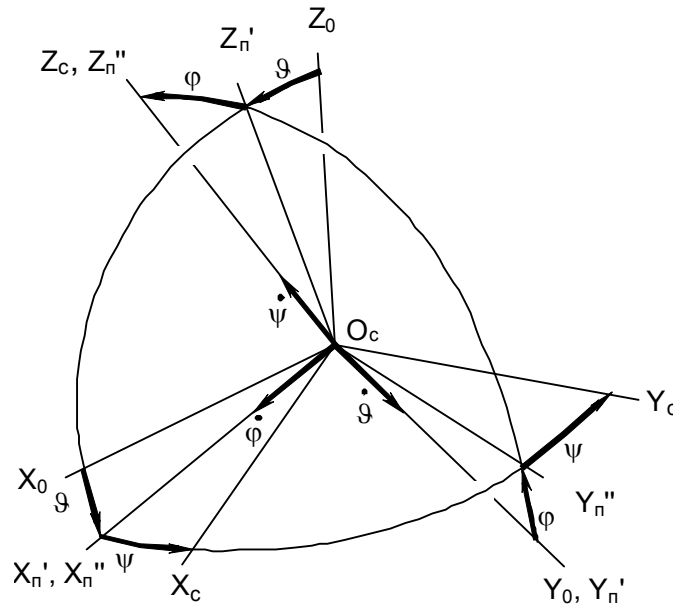


Рис. 3. Кути програмних відворотів КА

Отриманий можливий план функціонування (операцій управління) бортових систем КА закладається на «борт» КА в сеансі зв'язку:

$$\hat{Z}_{AN} = \hat{Z}_{Ei} + \hat{Z}_{CA}$$

де  $\hat{Z}_{AN}$  – план можливих операцій управління БС КА;  $\hat{Z}_{Ei}$  – план можливого функціонування апаратури корисного навантаження (БСК);  $\hat{Z}_{CA}$  – план можливих операцій управління забезпечувальною апаратурою.

Головним при плануванні роботи бортових забезпечувальних систем є виконання всього переліку необхідних операцій  $\hat{Z}_{CA}$  при оптимальному використанні ресурсів тому, у загальному випадку, бортовий ресурс КА можна умовно поділити на: технічний (невідновлюваний), енергетичний (частково відновлюваний, наприклад, за рахунок сонячних батарей) та інформаційний (ємність бортових запам'ятовуючих пристроїв), відновлюваний після кожного режиму відновлення інформації (ВІ) в сеансах зв'язку з КА.

Оскільки технічний ресурс є невідновлюваним, то при плануванні роботи БЗК доцільно, перш за все, економно його витратити. Тому використаємо ряд показників із [1] для оцінювання ступеня економного використання технічного ресурсу.

Кількість вмикань–вимикань  $l$  на інтервалі планування. Нормуючим параметром при цьому доцільно обрати максимально допустиму кількість вмикань–вимикань  $L$  за інтервал планування. Цей параметр залежить від особливостей побудови КА, визначається шляхом випробувань та наводиться в технічній документації на кожен підсистему КА.

Другим показником ефективності економного використання технічного ресурсу бортових забезпечувальних систем пропонується вибрати сумарний час їх функціонування за інтервал планування  $\tau$ . Цей критерій враховує зношування та старіння апаратури. Нормуючим параметром при цьому можна обрати, наприклад, інтервал планування  $O_j$ .

Третім показником пропонується обрати  $N_{CN}$  – потужність енергоспоживання забезпечувальних систем КА, нормуючим параметром при цьому стане  $N_3$  – загальна потужність, генерована системою електрозабезпечення.

Четвертим показником пропонується обрати прогнозовану величину заповнення запам'ятовуючого пристрою (ЗП) забезпечувальної апаратури  $I_{CA}$  (з практики об'єм ЗП модулю телеметрії), нормуючим пристроєм стане загальний об'єм ЗП  $I_{CI}$ .

Тоді оптимізаційним критерієм для планування роботи бортових забезпечувальних систем БКУ, стане:

$$Y_{Ci}(x) = \alpha_1 \cdot \frac{1}{1 - \frac{l}{L}} + \alpha_2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\tau}{T_I}} + \alpha_3 \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{C\bar{N}}}{N_C}} + \alpha_4 \cdot \frac{1}{1 - \frac{I_{C\bar{A}}}{I_{C\bar{I}}}}; \quad \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1.$$

Варто зазначити, що коефіцієнти  $\alpha_i$ , також визначаються методом експертних оцінювань заявником та розробником КСС, як і для районів зйомки, але їх значення різні для штатної експлуатації та різних видів нештатних ситуацій на борту КА.

Перепланування роботи БС КА бортовим комплексом управління здійснюється при таких подіях:

- закладення на борт КА нового плану роботи БС;
- відбракування отриманого знімка за хмарністю та вивільненню інформаційного ресурсу;
- залишок інформаційного ресурсу викликаний стисненням інформації;
- нештатні ситуації на борту КА.

Тому поряд із штатним режимом роботи і коригування закладеного на борт плану можливої роботи бортових систем БКУ і бортовий планувальник, як його складова система мають підтримувати КА в працездатному стані й підтримувати заданий ступінь надійності функціонування КА. Описати роботу БКУ в такому випадку можливо такою послідовністю операцій:

- виявлення відмови;
- локалізація місця відмови;
- аналіз ситуації та відновлення працездатності;
- перепланування роботи бортових систем відповідно до обстановки.

Перераховані вище операції можуть бути, в залежності від обстановки, реалізовані як в бортовому, так і в наземному комплексі управління. Формалізована схема контуру управління космічного апарату представлена на рисунку 4.

Блок В є засобами БКУ, С – апаратура БСК, А – усі інші забезпечувальні системи КА. Наземний комплекс управління виступає в ролі відновлювального пристрою. Виникнення відмов у блоках А та С інтерпретується як виникнення високопріоритетної заявки, що надходить на обслуговування в блок В (спроба локалізації місця відмови та відновлення працездатності засобами БКУ), де з ймовірністю  $P_0$  вона обслуговується (відбулось відновлення працездатності), чи з ймовірністю  $(1 - P_0)$  надходить до НКУ (відновлення працездатності не відбулося). Блок В також може бути ненадійним і може виходити з ладу як у вільному, так і у зайнятому стані (при обслуговуванні заявок з блоку А і С). Тобто НКУ має обслуговувати заявки на відновлення працездатності від усіх блоків. Також необхідно передбачити, що НКУ також ненадійний і може виходити з ладу як у вільному, так і в зайнятому стані. При виході з ладу НКУ самовідновлюється, якщо він вийшов з ладу в зайнятому стані відновлення обслуговування відбувається знову. Аналіз стану КА та відновлення його працездатності пропонується здійснювати на основі викладеного в [7, 8].

Тоді оптимальний план для роботи бортових систем отримується використовуючи математичну модель оптимізації вигляду:

$$opt Y_{\bar{A}\bar{N}} = \left( \arg \max_{i=1}^n Y_{\bar{E}\bar{I}^i}(\delta) \right) \cap \left( \arg \min_{x=1, N} Y_{C\bar{A}^i}(\delta) \right),$$

де  $n$  – кількість включених у план заявок на зйомку;  $N$  – кількість обов'язкових операцій функціонування забезпечувальної апаратури.

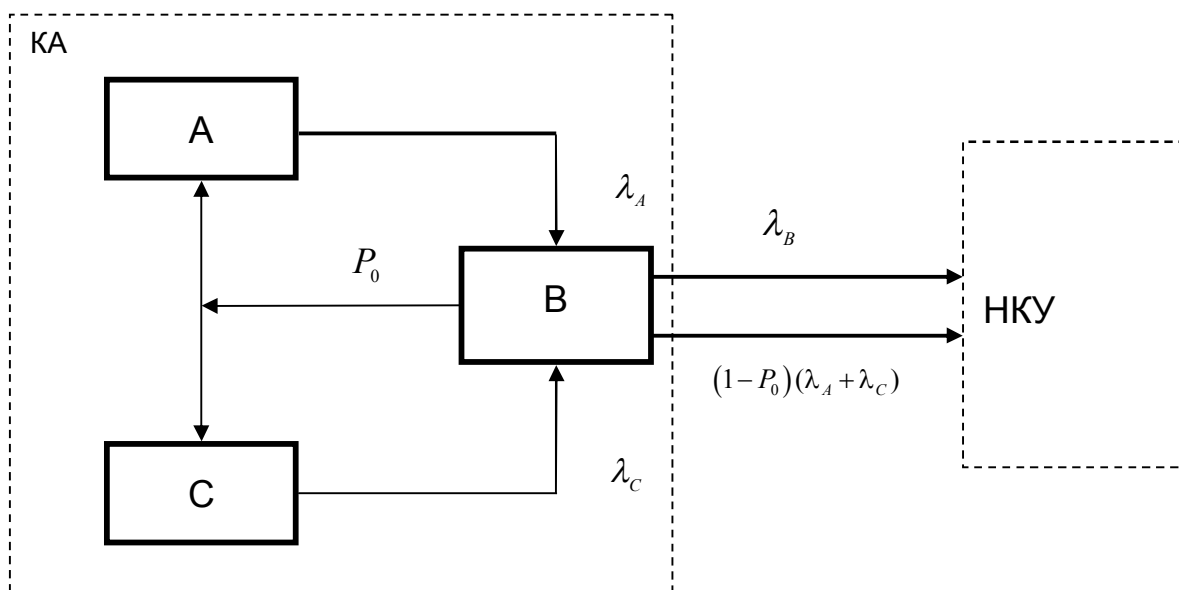


Рис. 4. Формалізована схема контуру управління КА при відмовах БА

Як обмеження виступають обмеження бортових ресурсів КА на інтервалі планування: електроенергетичних  $\sum_{i=1}^n c(x)N_{AA^i}(x) \leq N_C$ ; інформаційних  $\sum_{i=1}^n c(x)I_{AA^i}(x) \leq {}^2_{CI}$ ; технічних, де  $c(x) \in \{0,1\}$ ;  $N_C$  – загальний енергоресурс, генерований системою електрозабезпечення на інтервалі планування;  $N_{AA^i}$  – енергоресурс, необхідний для здійснення операції;  $I_{AA^i}$  – прогнозований об’єм записаної інформації;  ${}^2_{CI}$  – об’єм бортового запам’ятовуючого пристрою.

При аналізі вимог до планувальника та функціонування БКУ найбільш прийнятним є використання генетичних алгоритмів. Генетичні алгоритми є найновішими, але не єдиними способами вирішення задач оптимізації. Існує два основних шляхи вирішення таких задач: перебірний та локально-градієнтний.

Перший метод найбільш простий у реалізації. Для пошуку оптимального рішення необхідно обрахувати значення цільової функції в усіх можливих точках. Основний недолік – надзвичайно великі витрати обчислювальних ресурсів, але при можливості перебору за розумний час можна бути абсолютно впевненим, що знайдене рішення дійсно оптимальне.

Інший популярний спосіб заснований на градієнтних методах. При цьому спочатку обираються деякі випадкові значення параметрів, а потім ці значення поступово змінюють, добиваючись найбільшої швидкості росту цільової функції. Досягнувши локального максимуму, такі алгоритми зупиняються, тому для пошуку глобального оптимуму необхідні додаткові зусилля. Градієнтні методи працюють дуже швидко, але не гарантують оптимальності знайденого рішення. Оскільки завдання планування роботи бортових систем космічних апаратів є мультимодальною та багатомірною, не існує універсального методу, який би достатньо швидко знайшов абсолютно точне рішення.

Генетичний алгоритм є комбінацією між перебірним та градієнтним методом, що за розумний час знаходить точку, де значення цільової функції достатньо близьке до максимально можливого. Принцип його роботи заснований на моделюванні деяких механізмів популяційної генетики (рис. 5): маніпулювання хромосомним набором при формуванні генотипу нової біологічної особи шляхом наслідування ділянок хромосомних наборів батьків (кроссовер) і випадкова зміна генотипу, відоме в природі як мутація. Іншим, важливим механізмом, взятим з природи, є процедура природного відбору, направлена на покращення від покоління до покоління пристосованості членів популяції шляхом більшої здатності до «виживання» особин, які мають певні ознаки. Реалізацію такого алгоритму можливо представити як ітераційний процес, що включає декілька етапів.

Робота планувальника БКУ з питання створення плану роботи БС буде включати два етапи: перший – планування роботи забезпечувальних систем більш простий; другий – планування функціонування БСК. Розглянемо для прикладу формування плану функціонування БСК. Застосовуючи генетичний алгоритм, будемо розглядати кожен варіант плану  $Z_{\epsilon ik}$  – як індивідуума, а функцію корисності  $Y_{\epsilon ik}$  – як пристосованість цього індивідуума. Алгоритм планування бортових систем КА випадковим чином



генерує початкову популяцію структур  $Z_{\hat{e}i} = \{z_{\hat{e}i1}, \dots, z_{\hat{e}ik}\}$ , кожна з яких однозначно описує заявку на роботу бортових систем та вписується в величини ресурсних обмежень і сумісність режимів роботи. В формування початкової популяції доцільно жорстко закладати перелік визначених експлуатаційною документацією процедур роботи бортових забезпечувальних систем і екстрені заявки на роботу корисного навантаження і в подальшому, при функціонуванні алгоритму не змінювати їх. За сформованою популяцією розраховується значення цільової функції.

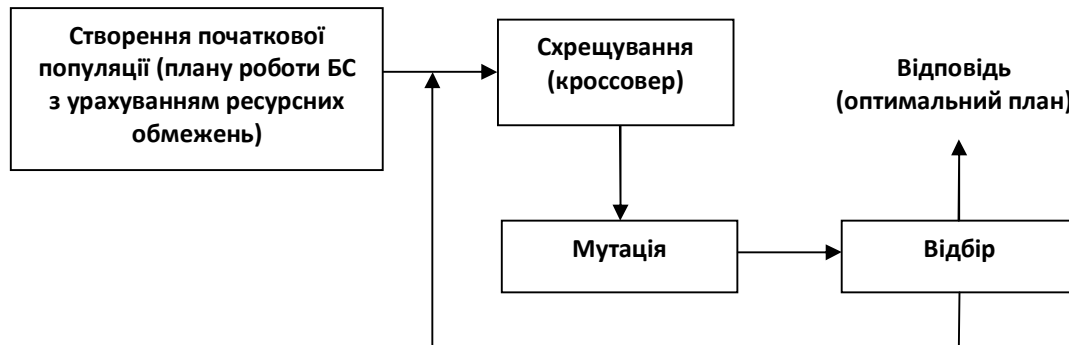


Рис. 5. Схема роботи алгоритму планування

Далі проводиться кроссовер, чи схрещування особин. Він може бути одноточковим, багатоточковим чи рівномірним. Математичний зміст даної операції – позиціонування рішення всередині багатокритеріального простору ознак. Після кроссовера відбуваються мутації структур, чи випадковим чином і з випадковою ймовірністю заміна деяких значень, що з одного боку зменшує швидкості сходження алгоритму, але й зменшує ймовірність попадання в точку локального екстремуму.

При кожній ітерації розраховується цільова функція за кожною зі структур, що визначає якість кожної з особин популяції. Декілька найкращих особин відбираються та заносяться в елітний фонд. Метод еліти застосовується для того, щоб у процесі розв'язання не погіршити якість рішення. Далі ітераційний процес повторюється, поки не буде досягнутий критерій зупинки. Після закінчення роботи алгоритму досягається максимум цільової функції. Результатом роботи бортового планувальника стає план роботи корисного навантаження КА  $Z_{\hat{e}i}$ , за яким досягається максимум цільової функції  $Y_{\hat{e}i} \rightarrow \max$ . Фактично, це включення в план тих зіймок, які приносять максимальну користь при оптимальній витраті ресурсів.

Важливим є те, що, на відміну від застосовуваних на теперішній час підходів, максимізація функції корисності корисного навантаження та оптимізації роботи забезпечувальної апаратури здійснюється не тільки наземними, а більшою мірою бортовими засобами. Оператор-планувальник має лише якісно планувати роботу бортового забезпечувального комплексу й обробляти заявки користувачів інформації та присвоювати їм динамічний пріоритет. На борт має закладатись програма із кількістю заявок на роботу апаратури корисного навантаження з перевищенням виділеного ресурсу, при потужному бортовому комп'ютері можливе закладання усіх можливих реалізацій. В апаратурі бортового спеціального комплексу після кожної зіймки проводиться відбракування знімку за хмарністю та, відповідно до викладеного в роботах [6, 7], бортовим комплексом управління здійснюється аналіз стану КА та оцінка обстановки, визначається кількість вивільненого ресурсу. За наявності такого ресурсу проводиться перепланування роботи бортової апаратури за викладеним у статті алгоритмом.

В процесі експлуатації КА «EgyptSat-1» та випробуваннях апаратно-програмних засобів планування роботи корисного навантаження КА «МС-2-8» було проведено моделювання та перевірка основних положень, викладених у статті. Результати показали, що в штатному режимі функціонування КА виключаються помилки оператора викликані неоднозначними визначеннями пріоритетів зіймок, як наслідок, кількість реалізованих заявок збільшується на 10–15 %. З іншого боку, підвищується автономність функціонування КА, рівень автоматизації операцій управління (планування), оперативність реагування на нештатні ситуації [3, 7, 8], кількість реалізованих заявок значно збільшується, але залежить від пори року (хмарність районів зіймки) та нештатних ситуацій на борту КА, що мають ймовірнісний характер. З практики експлуатації КА «EgyptSat-1», наслідки 60 % нештатних ситуацій могли бути усунені БКУ без втрати корисної інформації.

**Висновки.** Таким чином, практичне застосування запропонованих підходів до планування роботи бортових систем КА дозволить оптимізувати процес планування, адаптувати його до використання координатних методів управління. Ефективність обраних алгоритмів підтверджується також працями

[17–25] зарубіжних вчених, на відміну від яких у статті враховано обмеження однопунктної технології управління. Поряд із цим, необхідним є також і оптимізація структури наземного сегмента космічних систем.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Машков О.А.* Методика оптимізації планування орбітальних засобів космічних систем спостереження / *О.А. Машков, С.П. Фриз* // зб. наук. праць ЖВІРЕ. – Житомир : ЖВІРЕ. – № 6. – С. 80–91.
2. *Загорулько А.Н.* Особенности программных способов управления космическими аппаратами при однопунктной технологии / *А.Н. Загорулько* // Моделирование та інформаційні технології : зб. наук. праць. – Харків : НАНУ, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, 2005. – Вип. 32. – С. 80–87.
3. Пат. № 19490 Україна, МПК В64G1/24. Кординатно-часовий спосіб керування космічними апаратами : Пат. № 19490 Україна, МПК В64G1/24. / *О.М. Загорулько, В.І. Богомья, О.М. Моргу́н* (Україна). – № u2006 07244 ; заявл. 30.06.06 ; Опубл. 15.12.06 ; Бюл. № 12. – 8 с.
4. *Воронин А.Н.* Многокритериальный синтез динамических систем / *А.Н. Воронин*. – К. : Наукова думка, 1992. – 160 с.
5. *Ханцеверов Ф.Р.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли / *Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов*. — М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
6. *Мальшев В.В.* Оперативное планирование процесса съёмки земной поверхности с помощью автоматических ИСЗ / *В.В. Мальшев, Д.В. Моисеев* // Исслед. Земли из космоса. — 1982. — № 5. — С. 104–109.
7. Пат. № 26698 Україна, МПК В64G 1/24. Спосіб динамічної оцінки телеметричного параметра : Пат. № 26698 Україна, МПК В64G 1/24 / *О.М. Загорулько, В.В. Ожінський, О.М. Моргу́н, С.В. Козелков* (Україна). – № u2007 00827 ; заявл. 26.01.07 ; Опубл. 10.10.07 ; Бюл. № 16. – 6 с.
8. Пат. № 32203 Україна, МПК G05B 17/00. Спосіб керування космічними апаратами: Пат. № 32203 Україна, МПК G05B 17/00 / *В.В. Ожінський, О.М. Загорулько, В.І. Богомья* (Україна). – № u2007 14102 ; заявл. 14.12.07 ; Опубл. 12.05.08 ; Бюл. № 9. – 6 с.
9. Космические радиотехнические комплексы / под общ. ред. *Г.В. Стогова*. – М. : МО СССР, 1986. – 626 с.
10. *Белов Д.Г.* Формирование полетной программы работы космического аппарата при наличии электроэнергетических ограничений / *Д.Г. Белов* // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3, № 5/6. – С. 120–126.
11. *Абраменко Б.С.* Эксплуатация радиотехнических систем / *Б.С. Абраменко, И.В. Вольский, В.В. Гладченко*. – М. : МО СССР, 1982. – 326 с.
12. Системный подход к оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли / *А.Д. Федоровский, Л.Ф. Даргейко, В.П. Зубко, В.Г. Якимчук* // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 7, № 5/6. – С. 75–79.
13. *Авдудевский В.С.* Народнохозяйственные и научные космические комплексы / *В.С. Авдудевский, Г.Р. Успенский*. – М. : Машиностроение, 1985. — 416 с.
14. *Дружинин В.В.* Вопросы военной системотехники / *В.В. Дружинин, Д.С. Конторов*. – М. : Воениздат, 1976. – 224 с.
15. *Гарбук С.В.* Космические системы дистанционного зондирования Земли / *С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон*. – М., 1997. – 296 с.
16. *Aarts E.* Local Search in Combinatorial Optimization / *E.Aarts, J.K. Lenstra* // John Wiley & Sons. – 1997.
17. *Bensana E.* Earth Observation Satellite Management / *E.Bensana, M.Lemaitre, G.Verfaillie* // Constraints: An International Journal. – 1999. – 4(3):293–299.
18. *Harrison S.A.* Task scheduling for satellite based imagery. Dans Proceedings of the Eighteenth Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group / *S.A. Harrison, M.E. Price*. – University of Salford, UK, December, 1999. – P. 64–78.
19. *Van Hentenryck P.* Strategic directions in constraint programming / *P.Van Hentenryck, V.Saraswat* // ACM Computing Surveys. – 1996.
20. *Jaffar J.* Constraint logic programming: A survey / *J.Jaffar, M.Maher* // Journal of Logic Programming. – 1994.
- A. *Mackworth K.* The complexity of some polynomial network consistency algorithms for constraint satisfaction problems / *K.Mackworth* // Artificial Intelligence. – 25:65–74. – 1985.
21. *VanHentenryck P.* ILOG OPL 3.0, Optimization Programming Language, ReferenceManual / *P.Van Hentenryck* // ILOG, Janvier. – 2000.

22. Dealing with Uncertainty when Managing an Earth Observation Satellite / *G.Verfaillie, E.Bensana, C.Michelon-Edery, N.Bataille* // Dans Proc. of the 5th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation for Space (i-SAIRAS-99), pages 205–207, Noordwijk, The Netherlands. – 1999.
23. *Wolfe W.J.* Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain / *W.J. Wolfe, S.E. Sorensen* // Management Science, 46(1):148–168, January. – 2000.

ОЖІНСЬКИЙ Віктор Васильович – інженер лабораторії Національного центру управління та випробувань космічних засобів, Центр управління польотами КА, м. Євпаторія.

Наукові інтереси:

- аналіз та синтез автоматизованих систем управління;
- моделювання в космічних системах.

Тел./факс: (065)692–35-79, (093)391–56–78.

E-mail: cup@spacecenter.gov.ua; odjica@ukr.net.

ПАРФЕНЮК Василь Григорович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри радіотехнічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- управління та моделювання в космічних системах;
- радіотехнічні системи управління та передачі інформації.

Тел.: (0412)26–38–23; (097)937–45–22.

Подано 11.01.2011