

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З МІНІМІЗАЦІЄЮ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ

Отримали подальший розвиток моделі автономного планування роботи космічних апаратів. На прикладі функціонування системи електроживлення показано адаптивні можливості нелінійної схеми компромісів щодо врахування умов та тривалості експлуатації космічних апаратів. Вказано перспективні напрямки подальших досліджень.

Постановка проблеми. Завдання планування роботи космічних апаратів (КА) та їх угруповань – цілеспрямована діяльність, яка полягає в отриманні найкращих результатів від застосування КА (космічних систем) при відповідних обмеженнях, викликаних умовами функціонування. Постановка завдання планування передбачає наявність конкуруючих властивостей процесу між якістю виконання цільових завдань КА, наприклад, кількості відзнятих районів КА спостереження та витрачених ресурсів. Вибір компромісного варіанту між якістю виконання цільових завдань та витраченими ресурсами і є процедурою вирішення завдання планування як оптимізаційного. Оскільки космічні системи дуже складні, існує також велика кількість різноманітних обмежень. Додаткові обмеження, які знижують оперативність отримання інформації космічного знімання в Україні, насамперед, пов'язані з однопунктною технологією управління, яка обмежує час інформаційного обміну з КА. В умовах високої продуктивності бортових обчислювальних засобів логічним є більш ефективне їх використання та підвищення автономності функціонування КА.

Огляд останніх досліджень та публікацій. При постановці завдання планування операцій управління КА підходи вітчизняних [1–4] та зарубіжних [5–8] науковців дещо відрізняються. На даний час варто зазначити досягнення в напрямку формалізації процесів, які протікають у космічних системах, та закладення фундаменту власної наукової школи, яка принципово відрізняється від [5–8] та однозначно описує складні процеси, що протікають у космічних системах. У роботах [3, 4] вперше в Україні було висвітлено можливість підвищення ефективності функціонування космічних систем спостереження шляхом перерозподілу завдань між наземними та бортовими засобами, а саме частину завдань планування роботи бортових систем перекладено на бортовий комплекс управління. Проте в них основна увага приділялася роботі спеціальних систем, практика ж експлуатації КА «МС-2-8» виявила недоліки в функціонуванні забезпечувальних систем, зокрема підсистеми електроживлення.

Формулювання завдання дослідження. Основним завданням є розробка моделі автономного адаптивного планування роботи КА в умовах однопунктної технології управління.

Виклад основного матеріалу дослідження. Продовжуючи роботи у напрямку підвищення автономності функціонування КА, розвиваючи [3, 4], оцінимо здатність до адаптації виконання різноманітних операцій управління [9] підходу, оснований на

використанні нелінійної схеми компромісів [10]. Як приклад, дослідимо можливість адаптації до зміни характеристик та ресурсів підсистеми електроживлення, а саме бортових хімічних батарей.

У ході штатної експлуатації хімічної батареї в КА контролюються такі параметри [11]:

- напруга батареї та акумуляторів;
- струм заряду та розряду;
- ємність;
- температура плити батарей та акумуляторів;
- досягнення мінімальної напруги на батареї;
- досягнення максимальної напруги на батареї.

Як вихідні дані для планування роботи бортових систем КА визначається середньодобова потужність P_d і фактично допустима витрата енергетичних ресурсів для бортового планувальника $\Theta_o^E \leq P_d$. Варто зазначити, що значення P_d на початку терміну активного існування КА $P_{дс}$ та в кінці гарантованого терміну $P_{дф}$ дещо відрізняються. У вітчизняних КА за умови п'яти років активного існування $P_{дф} \approx 0,82P_{дс}$.

Таким чином, особа, що приймає рішення, чи бортовий планувальник мають враховувати не тільки поточну обстановку та ресурси на борту КА, але й фактори старіння апаратури тощо. Для розуміння дослідимо спрощений варіант моделей, описаних у [3, 4], та розглянемо випадок, коли оптимізація плану передбачає оптимізацію енергоспоживання КА. Метою оптимізації оберемо мінімізацію використання ресурсів підсистеми електроживлення. У цьому випадку оптимальними для виконання на інтервалі планування будуть операції

$$opt Y_{\Theta} = arg \min_{x=1, \overline{N}} Y_{O\Sigma}(x), \quad (1)$$

де Y_{Θ} – функція ресурсних витрат;

$Y_{O\Sigma}(x)$ – функція, яка характеризує витрати ресурсів системи електроживлення при виконанні певного набору операцій.

Крім того, при плануванні слід враховувати такі експлуатаційні характеристики хімічної батареї, які пов'язані з кількістю та глибиною розрядів []:

$L_{\Sigma 1}$ – допустима сумарна кількість розрядів на глибину Θ_{o1}^E (далі – розряд першого типу);

$L_{\Sigma 2}$ – допустима сумарна кількість розрядів на глибину Θ_{o2}^E (далі – розряд другого типу);

$L_{\Sigma 3}$ – допустима сумарна кількість розрядів на глибину Θ_{o3}^E (далі – розряд третього типу).

Розряди першого типу досить критичні, тому найчастіше при проектуванні технології функціонування підсистем електроживлення їх намагаються не допускати в умовах штатної експлуатації КА і трапляються вони переважно в умовах нештатних ситуацій. Розряди другого типу можуть виникати при спеціальних режимах функціонування підсистем електроживлення, наприклад, тестування, та при нештатних ситуаціях на борту

КА. Розряди третього типу виникають при штатній експлуатації КА в стандартних циклах розряду та заряду при перебуванні КА на освітленій та тіньовій ділянці траєкторії [11].

На відміну від [1–4], додатково запропонуємо ряд показників для оцінювання ступеня економного використання технічного ресурсу акумуляторних батарей:

кількість l_1 розрядів батареї на глибину Θ_{o1}^E з урахуванням інтервалу планування;

кількість l_2 розрядів батареї на глибину Θ_{o2}^E з урахуванням інтервалу планування;

кількість l_3 розрядів батареї на глибину Θ_{o3}^E з урахуванням інтервалу планування.

Нормуючим параметром для цих показників доцільно обрати відповідно допустимі сумарні кількості розрядів $L_{\Sigma 1}$, $L_{\Sigma 2}$, $L_{\Sigma 3}$.

Четвертим показником пропонується обрати E_{3C} – потужність енергоспоживання систем КА на інтервалі планування, нормуючим параметром при цьому стане E_3 – загальна потужність, генерована системою електрозабезпечення, яка корелюється з P_d .

Тоді скалярна згортка часткових критеріїв, яка виражає нелінійну схему компромісів для операцій управління, стане

$$Y_{O\Sigma}(x) = \alpha_1 \cdot \frac{1}{1 - \frac{l_1(x)}{L_{\Sigma 1}}} + \alpha_2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{l_2(x)}{L_{\Sigma 2}}} + \alpha_3 \cdot \frac{1}{1 - \frac{l_3(x)}{L_{\Sigma 3}}} + \alpha_4 \cdot \frac{1}{1 - \frac{E_{3C}(x)}{E_3}}, \quad (2)$$

де $\sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1$.

Коефіцієнти α_i визначаються методом експертних оцінювань замовником та розробником космічної системи, можуть змінюватись у ході її експлуатації відповідно до стану КА. Також варто зазначити, що за умови $(l_1 = L_{\Sigma 1}) \cup (l_2 = L_{\Sigma 2}) \cup (l_3 = L_{\Sigma 3}) \cup (E_{3C} = E_3)$ $Y_O(x) \rightarrow \infty$, тому для функціонування бортового планувальника необхідно [3, 4] або встановлювати обмеження $l_1 < L_{\Sigma 1} \cap l_2 < L_{\Sigma 2} \cap l_3 < L_{\Sigma 3} \cap E_{3C} < E_3$, що відповідає приблизно 5 рокам штатного функціонування КА спостереження типу «Січ-2», або продовжувати ресурс та збільшувати кількість допустимих розрядів у процесі льотної експлуатації КА за результатами аналізу поточного стану хімічних батарей [11]. Оскільки це не є метою статті, абстрагуємося від конкретних алгоритмів та технологій функціонування підсистем електроживлення КА та дослідимо (2).

Використовуючи метод експертних оцінок для моделювання за допомогою експертів ЦУПКА, визначимо такі значення $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 0,3$, $\alpha_3 = 0,15$, $\alpha_4 = 0,05$. Максимальні значення сумарних розрядів $L_{\Sigma 1} = 500$, $L_{\Sigma 2} = 2000$, $L_{\Sigma 3} = 27000$ взято з усереднених значень для бортових хімічних батарей, які використовувались у системах електроживлення вітчизняних КА. Значення E_{3C} реальні, отримані за допомогою спеціального програмного забезпечення ЦУПКА «МС-2-8». Розглянемо випадок, близький до ідеального: розрядів першого типу не відбувається на всьому періоді льотної експлуатації КА $l_1 = const = 0$; для тестування алгоритмів підсистеми електроживлення відбувся один розряд другого типу $l_2 = const = 1$; кожного витка здійснюється цикл заряду

та розряду третього типу (рис. 1). Розглядаються випадки, коли операції управління на певному інтервалі планування вимагають 10, 50 та 90% виділеного ресурсу: $\frac{E_{3C}(1)}{E_3} = 0,1$,

$$\frac{E_{3C}(2)}{E_3} = 0,5, \quad \frac{E_{3C}(3)}{E_3} = 0,9.$$

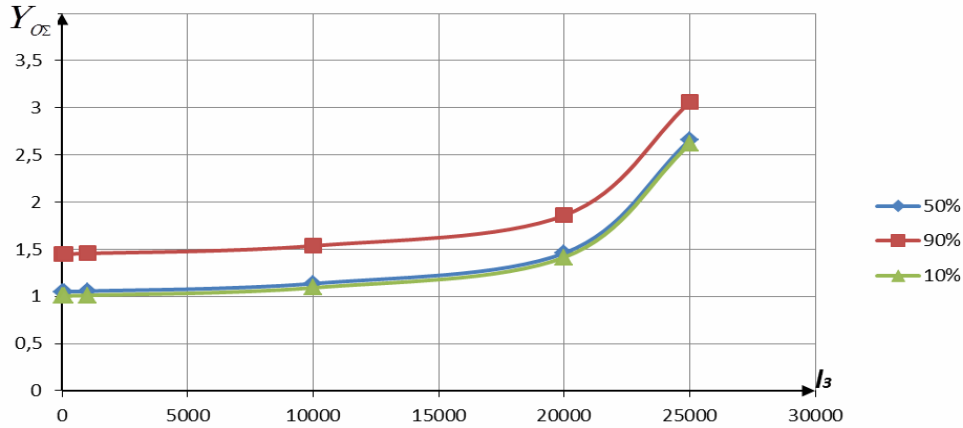


Рис. 1. Залежність $Y_{0\Sigma}$ від l_3

З рис. 1 бачимо, що як на початковому, так і на кінцевому етапі функціонування КА функція $Y_{0\Sigma}$ дозволяє бортовому планувальнику [4] чи особі, що приймає рішення (ОПР), запланувати операції, які вимагають менших витрат ресурсів. Також за умов наявності ресурсу (10–50% на рис. 1) значення функції відрізняється незначно, а от в ситуаціях, близьких до повного використання ресурсу, коли ОПР найчастіше робить помилки при плануванні, зростає досить швидко та допомагає прийняти правильне рішення як автоматичному планувальнику, так і ОПР. Також з графіка бачимо, що при наближенні до максимальних значень будь-якого показника формули (2) $Y_{0\Sigma}$ починає зростати нелінійно з високою швидкістю, що в результаті призводить до економії саме того виду ресурсу, який закінчується.

Розглянемо реальний випадок, використавши спеціальне програмне забезпечення ЦУПКА «МС-2-8», для кращої візуалізації обмежимося $N = 20$ варіантами можливого плану з різними значеннями обраних у статті показників.

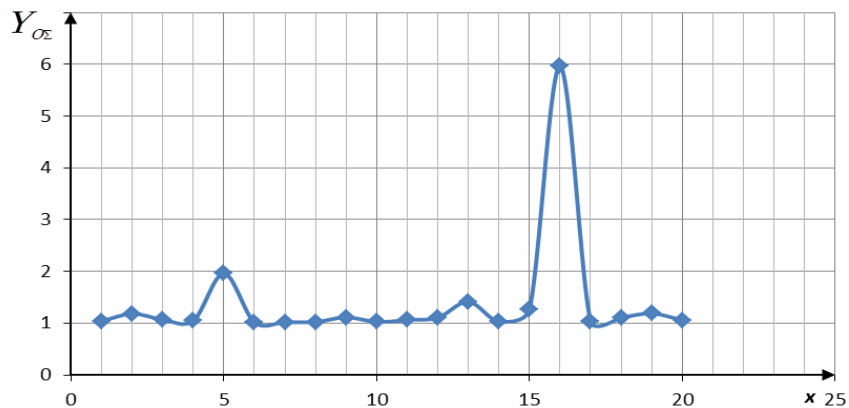


Рис. 2. $Y_{0\Sigma}$ у випадку, близькому до реального

На рис. 2 є два яскраво виражених максимуми – це плани № 5 та № 16, які не беруться в обробку як ОПР, так і бортовим планувальником [4], оскільки вимагають витрат великої кількості ресурсу. Але запланованими мають бути операції, які вимагають приблизно однакових витрат ресурсів, у результаті чого їх кількість досить велика навіть на добовому інтервалі планування, кількість можливих планів набагато більша. Тому найпростішим випадком є простий пошук мінімуму та вибору плану, який відповідає цьому мінімуму. Але цей шлях не враховує обстановки на борту КА, технологію управління та планування роботи КА [1–8], великого переліку інших обмежень, які описані в [1–10]. Використання не достатньо досліджених, але досить перспективних координатних методів управління, вимагають також розробки нових моделей проведення польотних операцій, технології управління КА.

Першим попереднім висновком є те, що використання нелінійної схеми компромісів [4, 10] дозволяє адекватно та оптимально оцінювати плани проведення операцій управління (наприклад, за мінімумом використання електроенергетичних ресурсів), що підтверджується результатами моделювання (див. рис. 1, 2). Також використання запропонованого підходу дозволяє адаптуватись до зниження ресурсу, викликаного різними причинами, та досить просто налагоджуватись зміною α у разі змін у технології функціонування КА тощо.

З іншого боку, існують проблеми у розв'язанні задачі знаходження екстремумів дискретних функцій, які є класом NP – складних задач, тобто необхідним є також пошук алгоритмів їх розв'язання бортовими і наземними засобами. Раціональніше для розв'язання таких задач у космічних системах використовувати різні алгоритми оптимізації для різних етапів планування [3–8]. Дослідження [3–8] доводять, що використання загальних алгоритмів недоцільне та знижує ефективність планування.

Висновки. Розвиваючи [1–8, 10], на прикладі підсистеми електроживлення показано спрощену модель планування з метою мінімізації використання електроенергетичних ресурсів КА. Доведено ефективність нелінійної схеми компромісів для використання в процесі планування операцій управління КА. Закладено основи для синтезу моделей автономного автоматичного бортового комплексу управління та бортового планувальника. У подальшому доцільним є: синтез моделей функціонування КА при координатних методах управління в умовах однопунктної технології; розробка ієрархічної моделі польотних операцій, враховуючи всі види обмежень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Машков О. А. Методика оптимізації планування орбітальних засобів космічних систем спостереження / О. А. Машков, С. П. Фриз // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІРЕ, 2003. – Вип. 6. – С. 80–91.
2. Мироненко В. М. Можливий підхід до формалізації процесів у космічних системах спостереження / В. М. Мироненко, П. В. Фриз, С. П. Фриз // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – Вип. 10. – С. 60–71.

3. Ожінський В. В. Аналіз способів планування роботи космічних апаратів бортовим комплексом управління / В. В. Ожінський // Водний транспорт. – 2011. – № 12. – С. 13–20.
4. Ожінський В. В. Планування роботи бортових систем КА при використанні координатних методів управління / В. В. Ожінський, В. Г. Парфенюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2011. – № 1(56). – С. 61–71.
5. Zilberstein S. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling / S. Zilberstein, Z. Koehler, Koenig. – Massachusetts : Massachusetts institute of technology, 2003. – 250 с. : іл. ISBN 1-57735-200-9 45.
6. Christopher G. Planning and Scheduling proximity operation for autonomous orbital rendezvous / G. Christopher. – Massachusetts : Massachusetts institute of technology, 2003. – 180 с.
7. Evans B. G. Satellite Communication Systems / B. G. Evans // The Institution of Engineering and Technology. – London : The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 727 с. – ISBN 0 85296 899 X.
8. Elbert B. L. Introduction to Satellite Communication / B. L. Elbert. – [Third Edition]. – Norwood : ARTECH HOUSE, 2008. – 447 с. ISBN-13: 978-1-59693-210-4.
9. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций / Елена Сергеевна Вентцель. – М. : Советское радио, 1964. – 384 с.
10. Воронин А. Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А. Н. Воронин. – К. : Наукова думка, 1992. – 160 с.
11. Аппарат космический «МС-2-8»-КС5МФ4. Инструкция по управлению в полёте. КС5МФ4. 94.0005.0000.0000.00.0 ИЭ63. – Дніпропетровськ : КБ «Південне», 2011. – 250 с.

Подано 28.01.2015

В. В. Ожинский

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ

Получили дальнейшее развитие модели автономного планирования работы космических аппаратов. На примере функционирования системы электропитания показаны адаптивные возможности нелинейной схемы компромиссов к условиям и длительности эксплуатации КА. Указаны перспективные направления дальнейших исследований.

V. V. Ozhinskyi

MODEL OF ADAPTIVE SPACECRAFTS WORK PLANNING WITH MINIMIZATION OF RESOURCES INVOLVED

The main proceedings of investigating process the use of spacecraft for their intended purpose are analyzed. The types of resources and deployment optimization spacecraft control operations. Directions for future research are promised.