

УДК 729.68

Шатіхін В.Є.¹, Макаров О.Л.², Попель В.М.², Хорошилов В.С.², Гурін В.О.²¹ Державне космічне агентство України. Україна, м. Київ² ДП «Конструкторське бюро «Південне», ім. М.К. Янгеля».

Україна, м. Дніпропетровськ

³ ДП «Науково-технічний центр «Триботехніка» ІТМ НАНУ та ДКАУ.

Україна, м. Київ

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ПРИВОДУ АНТЕНИ ТА СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Анотація

Розглядається метод підвищення точності оцінки імовірності безвідмовної роботи приводу антени та сонячної батареї на етапі їх проектування. Обґрунтовано шляхи підвищення точності оцінки надійності приводу антени та сонячної батареї космічного апарата дистанційного зондування Землі протягом терміну експлуатації у 10–15 років. Представлено рекомендації щодо заходів з підвищення надійності приводу.

Ключові слова: привід антени та сонячних батарей, надійність, підвищення точності.

Abstract

The precision increasing of reliability assessment for aerial and solar panel drive at design stage is considered. The means of precision increasing of reliability of aerial and solar panel drive of satellite during 10–15 years are substantiated. The recommendations of steps related to reliability increasing of aerial and solar panel drive are developed.

Key words: aerial and solar panel drive, reliability, precision increasing.

Вступ

На цей час у зв'язку зі збільшенням терміну активного існування, розширенням спектру вирішуваних завдань космічними апаратами дистанційного зондування Землі (КА ДЗЗ) актуальною постає задача достовірної оцінки надійності їх бортових агрегатів.

Супутніми факторами довготривалої експлуатації КА ДЗЗ, які впливають на надійність агрегатів космічного апарата (КА) є, зокрема, зношування деталей та вузлів, що труться, зміна фізико-механічних властивостей вуглепластикових фермових конструкцій під дією факторів космічного простору. Зазначені фактори зумовлюють зростання динамічного опору приводів антени та сонячної батареї, які є одними з найбільш віброак-

тивних агрегатів КА, і, зрештою, зумовлюють зменшення їх надійності.

Метою запропонованої статті є розроблення методу підвищення точності оцінки надійності приводу антени та сонячних батарей, а також надання рекомендацій щодо заходів з підвищення їх надійності. В подальшому в статті розглядається привід сонячних батарей (ПСБ), оскільки за основними технічними характеристиками він аналогічний приводу антени КА ДЗЗ, і отримані результати досліджень розповсюджуються на обидва приводи.

Дослідження

Запропонований метод передбачає визначення оцінки надійності ПСБ з урахуванням еволюції його динамічного опору і враховує наступні фактори, що зумовлюють збільшення динамічного опору ПСБ – співударання зубчатих колес редуктора, пружні коливання панелей сонячної батареї (СБ) та валів ПСБ, деградація механіко-інерційних властивостей панелей СБ, у динамічному коефіцієнті, який визначає ступінь збільшення динамічного опору ПСБ [2].

На рис.1 представлено типову блок-схема ПСБ, що досліджується.

Одним з найбільш ненадійних вузлів механічної частини ПСБ є редуктор, оскільки, як правило, він не має резервування. Тому в подальшому в статті

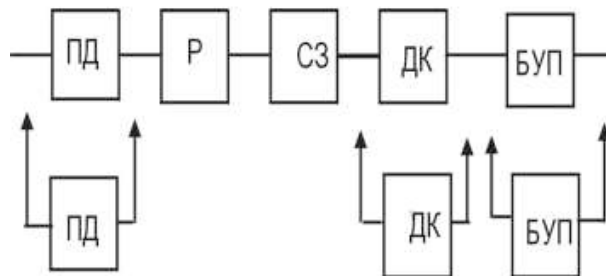


Рис. 1. Блок-схема приводу сонячних батарей.

На блок-схемі позначено: ПД – привідний двигун;
Р – редуктор; СЗ – струмознімач; ДК – датчик кута;
БУП – блок управління приводом

розглядається при аналізі ПСБ надійність саме багатоступеневого редуктора як найбільш слабкої ланки механічної частини ПСБ. Запропонований метод найбільше доцільний для габаритних КА ДЗЗ с масою не менше 1000 кг, привідним електродвигуном з редуктором, /вуглепластиковими каркасами панелей СБ. Для досліджень вибрано єдину математичну модель ПСБ разом з каркасами панелей СБ, що дозволило більш точно врахувати вплив зазначених вище факторів на надійність ПСБ. На рис. 2, 3 представлено ПСБ сучасних великогабаритних КА.

Основні фактори, що зумовлюють зміну динамічного опору ПСБ, приведено на рис. 4. Розроблений метод враховує як дію зовнішніх сил, так і дію сил внутрішньої взаємодії.

Внаслідок дії зовнішніх (сили гравітаційної взаємодії, аеродинамічний опір, сили світового тиску і т.д.) та наведених вище внутрішніх факторів, що зумовлюють віброактивність ПСБ, каркас панелей СБ отримує лінійні та кутові деформації, що спричиняють зміну моменту інерції каркасу і, як наслідок, динамічного опору ПСБ. Зношування елементів зубчатого зачеплення спричиняє появу додаткового динамічного опору, що зумовлений пружними ударами при виборці зазорів між зубчатыми колесами редуктора ПСБ. Протягом терміну експлуатації інтенсивність ударного навантаження буде збільшуватись, оскільки величина зношування елементів зубчатого зачеплення будуть збільшуватись з часом, і як наслідок, буде збільшуватись величина зазору між зубчатыми колесами. Причому, як показали дослідження, вплив зношування набагато суттєвіший у порівнянні з іншими факторами.

Зовнішні сили також зумовлюють зменшення міцносних характеристик редуктора та панелей СБ, а також втрату маси вуглепластикових каркасів панелей СБ, яка спричиняє зміну моменту інерції ПСБ, що врешті змінює динамічний опір ПСБ.

Серед зовнішніх сил найбільш активними щодо впливу на зміну масово-інерційних характеристик вуглепластикових каркасів панелей СБ є температура, вакуум та атомарний кисень, тобто фактори космічного простору (ФКП).

У цій статті аналізуються сили внутрішньої взаємодії, які зумовлюють зношування елементів зубчатого зачеплення редуктора ПСБ – зубчатих коліс та підшипників опор.

Обґрунтовано вибір показника надійності ПСБ, дослідження якого найбільш актуальне для експлуатації КА ДЗЗ з ДТАІ – ймовірність безвідмовної роботи ПСБ, оскільки цей показник визначає кількісну характеристику ймовірності виконання ПСБ своїх функцій протягом заданого часу експлуатації КА ДЗЗ.

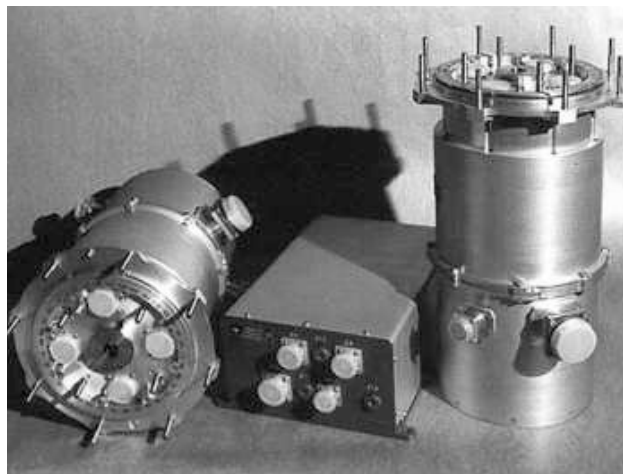


Рис. 2. ПСБ КА «Монітор-Е»



Рис. 3. ПСБ космічної станції «Мир»



Рис. 4.

Приріст динамічного опору ПСБ $\Delta M_{\text{динмакс}}$, який зумовлений еволюцією наведеними вище факторами, враховується за формулою [1]

$$\Delta M_{\text{динмакс}} = J_{\text{псб}} \varepsilon_c K_{\text{дин}}, \quad (1)$$

де $J_{\text{псб}}$ – момент інерції навантаження ПСБ; ε_c – середнє прискорення вихідного валу ПСБ.

Для оцінки динамічного коефіцієнту редуктора використано приведену нижче формулу (2) джерела [2], яка враховує співударання зубчатих коліс, які викликані їх зношуванням, пружні коливання валів та панелей СБ з урахуванням деградації їх механіко-інерційних властивостей.

$$K_{\text{дин}} = 1 + \left(1 - \frac{M_{\text{стат}}}{M_{\text{псбпр}}^{\Sigma}}\right) \sqrt{1 + \frac{C_{\text{п}}^2 \omega_{\text{уд}}^2}{J_{\text{псбпр}}^2 \varepsilon_c^2 \Theta^2}}, \quad (2)$$

де $M_{\text{псбпр}}^{\Sigma}$ – середній сумарний (сума статичного та динамічного опору) опір ПСБ; $M_{\text{стат}}$ – статичний момент інерції навантаження; $J_{\text{псбпр}}$ – приведений до валу привідного електродвигуна момент інерції ПСБ; $C_{\text{п}}$ – приведена до валу привідного двигуна жорсткість передач; $\omega_{\text{уд}}$ – початкова швидкість удару зубів у зачепленні; Θ – частота вільних коливань ПСБ.

Θ та $\omega_{\text{уд}}$ визначаються співвідношеннями джерела [2]

$$\Theta = \sqrt{\frac{C_{\text{п}} (J_{\text{дв}} + J_{\text{псбпр}})}{J_{\text{дв}} J_{\text{псбпр}}}}, \quad \omega_{\text{уд}} = \sqrt{2 \varepsilon_c \Delta \delta_{\text{смакс}}}, \quad (3)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна та приведених до нього передач; $\Delta \delta_{\text{смакс}}$ – приведений до валу двигуна максимальний зазор у зубчатих передачах ПСБ.

Підставивши вирази (3) у вираз (2) та після відповідних перетворень отримуємо

$$K_{\text{дин}} = 1 + \left(1 - \frac{M_{\text{стат}}}{M_{\text{псбпр}}^{\Sigma}}\right) \sqrt{1 + \frac{2 C_{\text{п}} \Delta \delta_{\text{смакс}} J_{\text{дв}}}{J_{\text{псбпр}}^2 \varepsilon_c^2 (J_{\text{дв}} + J_{\text{псбпр}})}} \quad (4)$$

Розглядаючи вплив ФКП на еволюцію динамічного опору необхідно відмітити, що дія ФКП на вуглепластикові каркаси панелей СБ має достатньо складний характер, залежить, зокрема, від висоти польоту КА, нахилу та ексцентриситету орбіти, а також інших умов польоту. Втрата маси під дією температури та вакууму відбувається інтенсивно в перші місяці експлуатації КА, далі процес переходить у фазу насичення і втрата маси вуглецю визначається в середньому з розрахунку зменшення шару вуглепластику на 1 ангстрем кожний день [6]. Втрата маси у першій фазі польоту визначається на основі експериментальних даних, що прово-

дяться для кожного виду матеріалу, який застосовується у космічній техніці.

Дія атомарного кисню має неперервний характер і визначається флюенсом протягом певного терміну дії цього фактору та коефіцієнтом ерозії, який визначається експериментально для кожного матеріалу. Причому, у перші 3–4 роки експлуатації вуглецевопластикові каркаси від дії атомарного кисню захищає захисна плівка, далі плівка руйнується і втрата маси здійснюється набагато інтенсивніше. Тому впровадження нових захисних покриттів щодо запобігання шкідливому впливу атомарного кисню протягом довготривалого терміну активного існування КА ДЗЗ у 10–15 років є актуальним завданням сьогодення. Необхідно відзначити, що негативний вплив атомарного кисню актуальний для висот до 600–700 км, саме для висоти польоту КА та космічних станцій, для ПСБ яких запропоновано зазначений метод. Для інших висот польоту спостерігається більш активна дія інших чинників.

З урахуванням викладених вище особливостей стосовно впливу ФКП отримано аналітичний вираз визначення еволюції моменту інерції ПСБ.

$$J_{\text{псб}} = (\rho_{\text{пр}} \frac{(a+c)bl}{12} k_{\text{нас}} - m_{\text{р1}}) (l^2 + (a+c)^2), \quad (5)$$

де $\rho_{\text{пр}}$ – приведена густина каркасу панелей СБ; a – товщина сотового шару каркасу; c – товщина шару вуглепластику каркасу; b – ширина каркасу; l – довжина каркасу; $k_{\text{нас}} = 0,993$ – коефіцієнт насичення, що визначає втрату маси каркасу від дії температури та вакууму після режиму насичення [6]; $m_{\text{р1}}$ – втрата маси всього каркасу панелей СБ від дії атомарного кисню

$$m_{\text{р1}} = Flbk_{\text{ер}}, \quad (6)$$

де F – флюенс атомарного кисню за роки експлуатації КА; $k_{\text{ер}}$ – коефіцієнт ерозії атомарного кисню [6].

Під дією температури та вакууму після режиму насичення визначалась як

$$\Delta m_{\text{вк}} = m_{\text{вк}} k_{\text{нас}} - 365 t_{\text{рвк}} \rho_{\text{вк}} a_{\text{к}} b_{\text{к}} l_{\text{вк}}, \quad (7)$$

де $t_{\text{р}}$ – кількість років експлуатації ПСБ; $l_{\text{вк}}$ – товщина шару вуглепластику, на яку зменшується його товщина протягом доби польоту; $a_{\text{к}}$ – довжина вуглепластикового каркаса; панелей СБ; $b_{\text{к}}$ – ширина вуглепластикового каркаса; $\rho_{\text{вк}}$ – густина матеріалу каркаса.

Отриманий враховується у визначенні сили нормального зачеплення для кожного ступеня редуктора [2].

$$N = \frac{M_{\text{п}}}{r_{\text{пр}}} i K_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{дин}} (1+k_c)}{r_{\text{пр}}} i K_{\text{дин}}, \quad (8)$$

де $M_{\text{п}}$ – пусковий момент привідного двигуна ПСБ; $r_{\text{пр}}$ – приведений радіус діляльних кіл зубчатих коліс ступеня редуктора; i – передаточне відношення ступеня редуктора; k_c – коефіцієнт, що враховує



частку статичного опору по відношенню до динамічного опору ПСБ.

Далі за формулами джерел [2,3,4] визначається імовірність безвідмовної роботи редуктора ПСБ.

$$F_c = 0.328 \sqrt{\frac{N E_{PP}}{b_3 r_{PP}}}, \sigma_v = k \sqrt{\sigma_p^2 \sigma_v^2 + P_c^2 \sigma_v^2 + v_{кз}^2 \sigma_p^2}, \quad (9)$$

$$= 0.5 + \Phi \left(\frac{U_{MAX} - M_{HO} - \gamma_{CP} t_{EKCH}}{\sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_v^2 t_{EKCH}^2}} \right), P_p = \prod_{i=1}^m P_{31} P_{32} \dots P_{3m} \quad (10)$$

де F_c – середнє значення тиску зачеплення; b_3 – ширинна вінця зубчатих коліс ступеня; r_{PP} – приведений модуль Юнга матеріалу зубчатих коліс ступеня; E_{PP} – коефіцієнт зносу зубчатих коліс; $v_{кз}$ – швидкість ковзання; k – середньквдратичне відхилення середнього тиску у контакті зубів; $v_{кз}$ – середньквдратичне відхилення швидкості ковзання; σ_p – максимальний знос зуба; σ_v – термін експлуатації ПСБ; U_{MAX} – нормована функція Лапласа; t_{EKCH} – математичне сподівання відхилень діаметру зубчатого колеса; Φ – середнє квадратичне відхилення діаметру зубчатого колеса; M_{HO} – середнє значення швидкості зношування зуба передачі; σ_H – середнє квадратичне відхилення швидкості зношування; σ_v – імовірність безвідмовної роботи редуктора; P_p – ймовірність безвідмовної роботи зуба редуктора; P_3 – кількість зубів редуктора.

Як витікає з аналізу формул (8)–(10) імовірність безвідмовної роботи ПСБ є функцією від динамічного опору та динамічного коефіцієнту ПСБ, що аналітично підтверджує концепцію запропонованого методу.

Для дослідження у цій статті вибрано великогабаритний КА з технічними характеристиками, аналогічними вітчизняному КА «Океан-О» та КА Європейського космічного агентства «Envisat». Розрахунки проведено в середовищі Matlab для габаритного КА ДЗЗ з механічною частиною ПСБ аналогічній КА «Океан-О», проте з вуглепластиковими каркасами панелей СБ з моментом інерції, еквівалентним моменту інерції панелей СБ КА «Океан-О».

На рис. 5 на осі ординат позначено імовірність безвідмовної роботи редуктора ПСБ, на осі абсцис – термін експлуатації ПСБ. Розглядаються варіанти з авторським методом оцінки надійності та базовий метод. На рис. 6 представлено залежність імовірності безвідмовної роботи кожного зубчатого колеса ПСБ від терміну експлуатації коліс.

За результатами досліджень проведено аналіз, який, зокрема, необхідний для розробки заходів щодо підвищення надійності ПСБ:

1. Застосування передових більш зносостійких та довговічних матеріалів зубчатих коліс редуктора та струмознімача.

2. Опрацювання варіанту дублювання високошвидкісних ступенів редуктора, де знос особливо інтенсивний. Обґрунтовується це також тим, що для великогабаритних КА нерідко для надійності застосовують два привідних двигуна.

3. Використання привідного двигуна з меншим моментом інерції якоря (4).

4. Забезпечення розробки відповідного конструктиву зубчатих коліс останніх ступенів редуктора, що забезпечує зменшення сили нормального зачеплення.

5. Впровадження сучасних заходів, що забезпечують більш ефективний захист вуглепластикових каркасів панелей СБ від впливу ФКП.

Впровадження тих чи інших заходів щодо зміни конструктиву бортового комплексу КА зумовлює необхідність проведення оцінки економічної ефективності використання запропонованих заходів.

Зокрема, у цьому випадку, з підвищення надійності ПСБ КА ДЗЗ.

В якості економічного критерію впроваджених заходів була використана порівняльна ефектив-

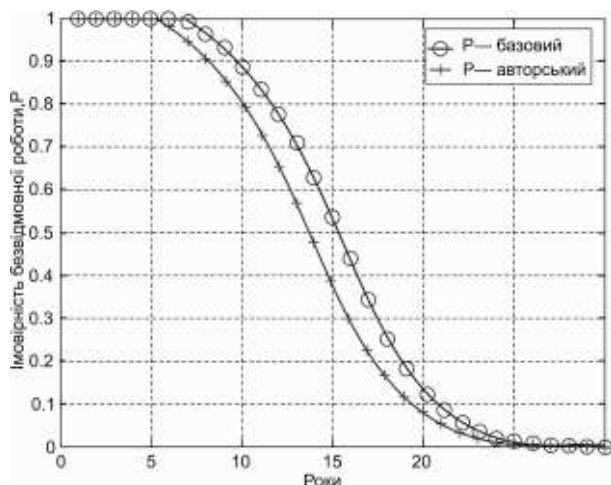


Рис. 5. Імовірність безвідмовної роботи ПСБ за базовим та авторським методом

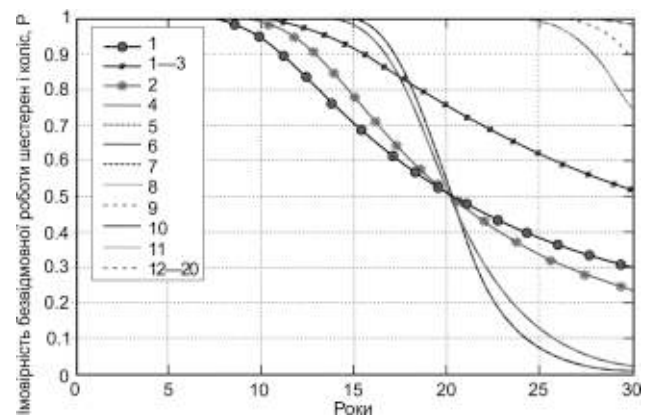


Рис. 6. Імовірність безвідмовної роботи зубчатих коліс ПСБ

Таблиця 1.

Реалізація заходів з підвищення надійності ПСБ

Заходи з підвищення надійності приводу сонячних батарей	Збільшення терміну експлуатації КА, роки	Наслідки реалізації заходів для космічних апаратів		
		Збільшення маси, кг $\Delta m_{кл}$	Збільшення енергоспоживання, Вт $\Delta W_{кл}$	Порівняльна ефективність, e
Більш зносостійкі матеріали зубчатих колес редуктора	$2)t_{експл} > 1$	—	—	$e \geq 2$
Зубчаті колеса більш високої точності виготовлення				
Привідні двигуни з меншим моментом інерції якоря				
Маховики-компенсатори, пружні, магнітні муфти	$t_{експл} \geq 2$	$\Delta m_{КА} \geq 10$	$\Delta W_{КА} \geq 50$	$e(2$
Введення пристроїв для стабілізації руху каркасів панелей сонячних батарей				
Система управління кутовим прискоренням привідного двигуна				

ність використання базового КА ДЗЗ та КА з впровадженими заходами підвищення надійності ПСБ.

$$e = \frac{E_{КАВІР} - E_{КАБАЗ}}{C_{КАВІР} - C_{КАБАЗ}}, \quad (11)$$

де $E_{КАВІР}$, $E_{КАБАЗ}$, $C_{КАВІР}$, $C_{КАБАЗ}$ – відповідно економічні ефекти від експлуатації, вартості КА з впровадженими заходами з підвищення надійності та базового КА.

У ході досліджень були проведені розрахунки в частині застосування більш зносостійких матеріалів коліс редуктора, застосування зубчатих коліс більш високої точності виготовлення та привідного двигуна з меншим моментом інерції якоря.

Для вибору того чи іншого методу необхідно оцінити їх порівняльну ефективність. Наведена нижче таблиця № 1 демонструє, зокрема, наслідки застосування того чи іншого виду захисту з урахуванням їх порівняльної ефективності

Висновки

1. Напрями проектування сучасних КА ДЗЗ підтверджують необхідність удосконалення та розробки нових більш точних методів оцінки надійності бортових агрегатів.

2. Запропонований метод дозволяє підвищити точність оцінки надійності безвідмовної роботи ПСБ з довготривалим терміном активного існування в залежності від терміну його експлуатації до 8 процентів.

3. Розроблений метод оцінки ймовірності безвідмовної роботи ПСБ доцільно також використовувати для прогнозування надійності інших бортових агрегатів великогабаритних КА ДЗЗ, які мають електропривод з редуктором.

4. Залишається актуальним питання щодо розробки нових заходів підвищення надійності ПСБ великогабаритних КА ДЗЗ.

Література

1. Вульфсон И.И., Ерихов М.Л., Коловский М.З. Механика машин. – М.: Высшая школа, 1996. – 510 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
3. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 574 с.
4. Слюдиков М.Н. Надежность и точность механизмов приводов систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1984. – 350 с.
5. Шатіхін В.Є., Семенов Л.П., Хорошилов В.С., Попель В.М., Костенко Г.А. Врахування зносу зубчатих передач при оцінюванні динамічних характеристик приводу сонячних батарей // Космічна наука і технологія, Київ. 2006 – т.12, № 4, – С. 33–37.
6. Шувалов В.А., Кочубей Г.С., Приймак А.И., Письменный Н.И., Токмак Н.А. Изменение свойств материалов панелей солнечных батарей КА под воздействием атомарного кислорода // Космические исследования, М. 2007 – т. 45, № 4, – С. 1–11.