

УДК 729.68

Шатіхін В. Є.<sup>1</sup>, Макаров О. Л.<sup>2</sup>, Гусинін В. П.<sup>1</sup>, Ольшевський О. Л.<sup>2</sup>, Петренко Г. В.<sup>2</sup>,  
Хорошилов В. С.<sup>2</sup>, Попель В. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державне космічне агентство України. Україна, Київ

<sup>2</sup> ДП «Конструкторське бюро „Південне“ імені М. К. Янгеля». Україна, Дніпропетровськ

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ПРИВОДУ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ З ДОВГОТРИВАЛИМ ТЕРМІНОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### *Анотація*

Запропоновано метод підвищення точності оцінки імовірності безвідмовної роботи приводу сонячної батареї на етапі його проектування.

Обґрунтовано шляхи підвищення точності оцінки надійності приводу сонячної батареї.

Встановлено аналітичні співвідношення, що дозволили оцінити імовірність безвідмовної роботи ПСБ протягом терміну експлуатації у 20–25 років.

Представлено рекомендації щодо підвищення надійності приводу сонячної батареї з довготривалим терміном експлуатації.

### *Abstract*

*The method of precision increasing of reliability probability estimate for solar panel drive with long lifetime at design stage is given.*

*The means of precision increasing of reliability for solar panel drive are substantiated.*

*The analytic relations about reliability probability estimate for solar panel drive with long lifetime during 20–25 years are determined.*

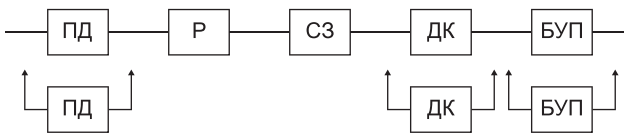
*The recommendations of increasing of reliability for solar panel drive with long lifetime are developed.*



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 його 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 приводу сонячної батареї (ПСБ), який є одним з найбільш віброактивних агрегатів КА, і, зрештою, зменшення імовірності безвідмовної роботи ПСБ.

Розроблений метод передбачає оцінку надійності ПСБ з урахуванням еволюції його динамічного опору, враховує фактори, що зумовлюють збільшення динамічного опору ПСБ – співударяння зубчатих коліс редуктора, пружні коливання панелей сонячної батареї (СБ) та валів ПСБ, деградація механіко-інерційних властивостей панелей СБ, у коефіцієнті динамічності  $K_{\text{дин}}$ , який визначає ступінь збільшення динамічного опору ПСБ (1). Одним з найбільш ненадійних вузлів механічної частини ПСБ є редуктор, оскільки, як правило, він не має резервування. Тому в подальшому в статті розглядається надійність саме багатоступеневого редуктора як найбільш слабкої ланки механічної частини ПСБ (рис. 1).



**Рис. 1.** Блок-схема приводу сонячних батарей:  
ПД – привідний двигун; Р – редуктор; СЗ – струмознімач;  
ДК – датчик кута; БУП – блок управління приводом

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.

Для оцінки динамічного коефіцієнту кожного ступеня редуктора використано приведену нижче формулу (1) джерела [2], яка враховує співударяння зубчатих коліс, які викликані їх зношуванням, пружні коливання валів та панелей СБ з урахуванням деградації їх механіко-інерційних властивостей.

$$K_{\text{дин}} = 1 + \left( 1 - \frac{M_{\text{С2}}}{M_{12\text{СР}}} \right) \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 \omega_{\text{УД}}^2}{\varepsilon_{\text{СР}}^2 J_{\text{ПСБПР}}^2 \Omega^2}}, \quad (1)$$

- де  $K_{\text{дин}}$  – динамічний коефіцієнт;  
 $c_{12}$  – приведена до вала двигуна жорсткість передач ступеня;  
 $J_{\text{ПСБПР}}$  – приведений до вала електродвигуна момент інерції навантаження  
 ПСБ (панелей СБ)  $J_{\text{ПСБПР}} = \frac{J_{\text{ПСБ}}}{i^2}$ ;  
 $\Omega$  – частота власних коливань ПСБ;  
 $i$  – передаточне співвідношення ступеня відносно привідного двигуна редуктора;  
 $\omega_{\text{УД}}$  – початкова швидкість під час удару зубчатих коліс;  
 $M_{\text{С2}}$  – приведений момент статичного навантаження;  
 $M_{12\text{СР}}$  – момент середнього навантаження;  
 $\varepsilon_{\text{СР}}$  – середнє прискорення привідного електродвигуна ПСБ.

Розроблений метод враховує також еволюцію моменту інерції ПСБ, що зумовлена впливом температури, вакууму та атомарного кисню навколишнього космічного простору.

З урахуванням деформації каркасу, втрати маси від температури та вакууму момент інерції навантаження ПСБ  $J_{\text{ПСБ}}$  на підставі джерел [1, 2, 5, 6] визначається

$$J_{\text{ПСБ}} = \rho_{\text{ПР}} \frac{(a+c+w)bl}{12} k_{\text{НАС}} k_p (l^2 + (a+c+w)^2), \quad (2)$$

- де  $\rho_{\text{ПР}}$  – приведена густина каркасу панелей СБ;  
 $a$  – товщина сотового шару каркасу;  
 $c$  – товщина шару вуглепластика 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];  
 $w$  – лінійна деформація каркасу;  
 $k_p$  – коефіцієнт, що визначає втрату маси каркасу після режиму насичення з одного квадратного метру каркасу

$$k_p = 1 - (n_p \rho_{\text{ВУГЛ}} 365 \cdot 10^{-10}),$$

- де  $n_p$  – кількість років експлуатації;  
 $\rho_{\text{ВУГЛ}}$  – густина вуглепластику;  
 $10^{-10}$  (м – ангстрем) – товщина шару вуглепластику, на яку щоденно зменшується каркас від дії температури та вакууму [6].

Формула (2) справедлива в перші 3–4 роки експлуатації, коли захисна плівка захищає від дії атомарного кисню [6]. Під час подальшої експлуатації формула (2) має вигляд

$$J_{\text{ПСБ}} = (\rho_{\text{ПР}} \frac{(a+c+w-h)bl}{12} k_{\text{НАС}} k_p - m_{p1}) \times (l^2 + (a+c+w-h)^2),$$

де  $m_{p1}$  — втрата маси всього каркасу панелей СБ від дії атомарного кисню;  
 $h$  — зменшення товщини шару вуглепластику;

$$m_{p1} = Flbk_{\text{ЕР}},$$

де  $F$  — флюенс атомарного кисню за роки експлуатації КА;  
 $k_{\text{ЕР}}$  — коефіцієнт ерозії атомарного кисню [6];  
 $m_p = 10Fk_{\text{ЕР}}$  — втрата маси одного квадратного метру каркасу панелей СБ.

$$h = \frac{m_p}{\rho_{\text{ВУГЛ}}}.$$

Отриманий динамічний коефіцієнт  $K_{\text{ДИН}}$  враховується у визначенні сили нормального зачеплення  $N$  для кожного ступеня редуктора.

$$N = \frac{M_{\text{П}}}{r_{\text{ПР}}} i K_{\text{ДИН}},$$

де  $M_{\text{П}}$  — пусковий момент привідного двигуна ПСБ;  
 $r_{\text{ПР}}$  — приведений радіус ділільних кіл зубчатих коліс ступеня редуктора.

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

$$P_C = 0,328 \sqrt{\frac{N E_{\text{ПР}}}{b_3 r_{\text{ПР}}}},$$

$$\sigma_\gamma = k \sqrt{\sigma_p^2 \sigma_v^2 + P_C^2 \sigma_v^2 + v_{\text{КЗ}}^2 \sigma_p^2},$$

$$P_3 = 0,5 + \Phi \left( \frac{U_{\text{МАХ}} - M_{\text{Н0}} - \gamma_{\text{СР}} t_{\text{ЕКСП}}}{\sqrt{\sigma_{\text{Н}}^2 + \sigma_\gamma^2 t^2_{\text{ЕКСП}}}} \right),$$

$$P_p = \prod_{i=1}^m P_{31} P_{32} \dots P_{3m},$$

де  $P_C$  — середнє значення тиску зачеплення;  
 $b_3$  — ширина вінця зубчатих коліс ступеня;  
 $E_{\text{ПР}}$  — приведений модуль Юнга матеріалу зубчатих коліс ступеня;  
 $k$  — коефіцієнт зносу зубчатих коліс;  
 $v_{\text{КЗ}}$  — швидкість ковзання;  
 $\sigma_p$  — середньквдратичне відхилення середнього тиску у контакті зубів;  
 $\sigma_v$  — середньквдратичне відхилення швидкості ковзання;

$U_{\text{МАХ}}$  — максимальний знос зуба;  
 $t_{\text{ЕКСП}}$  — термін експлуатації ПСБ;  
 $\Phi$  — нормована функція Лапласа;  
 $M_{\text{Н0}}$  — математичне сподівання відхилень діаметру зубчатого колеса;  
 $\sigma_{\text{Н}}$  — середнє квадратичне відхилення діаметру зубчатого колеса;  
 $\gamma_{\text{СР}}$  — середнє значення швидкості зношування зуба передачі;  
 $\sigma_\gamma$  — середнє квадратичне відхилення швидкості зношування;  
 $P_p$  — імовірність безвідмовної роботи редуктора;  
 $P_3$  — імовірність безвідмовної роботи зуба редуктора;  
 $m$  — кількість зубів редуктора.

Розрахунки проведені в середовищі Matlab для габаритного КА ДЗЗ з механічною частиною ПСБ аналогічній КА «Океан-О», проте з вуглепластиковими каркасами панелей СБ з моментом інерції, рівним моменту інерції панелей СБ КА «Океан-О».

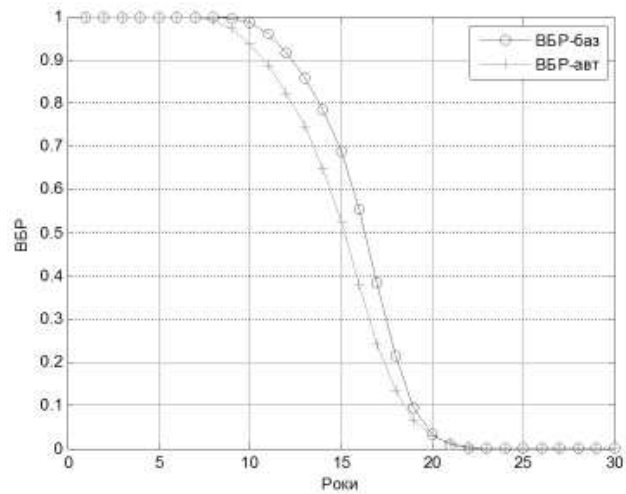


Рис. 2. Оцінка імовірності безвідмовної роботи ПСБ

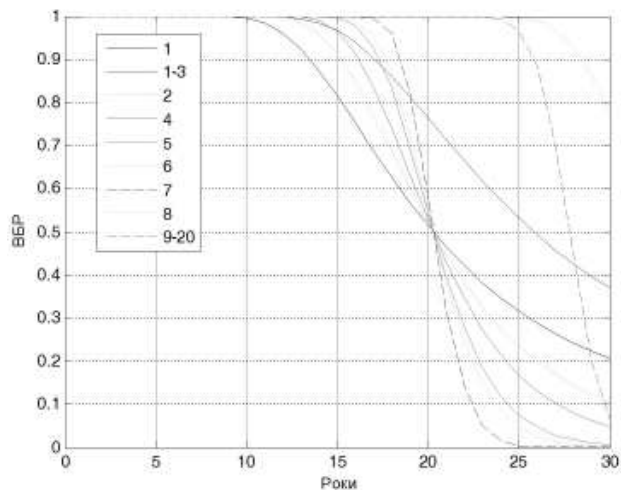


Рис. 3. Імовірність безвідмовної роботи коліс редуктора

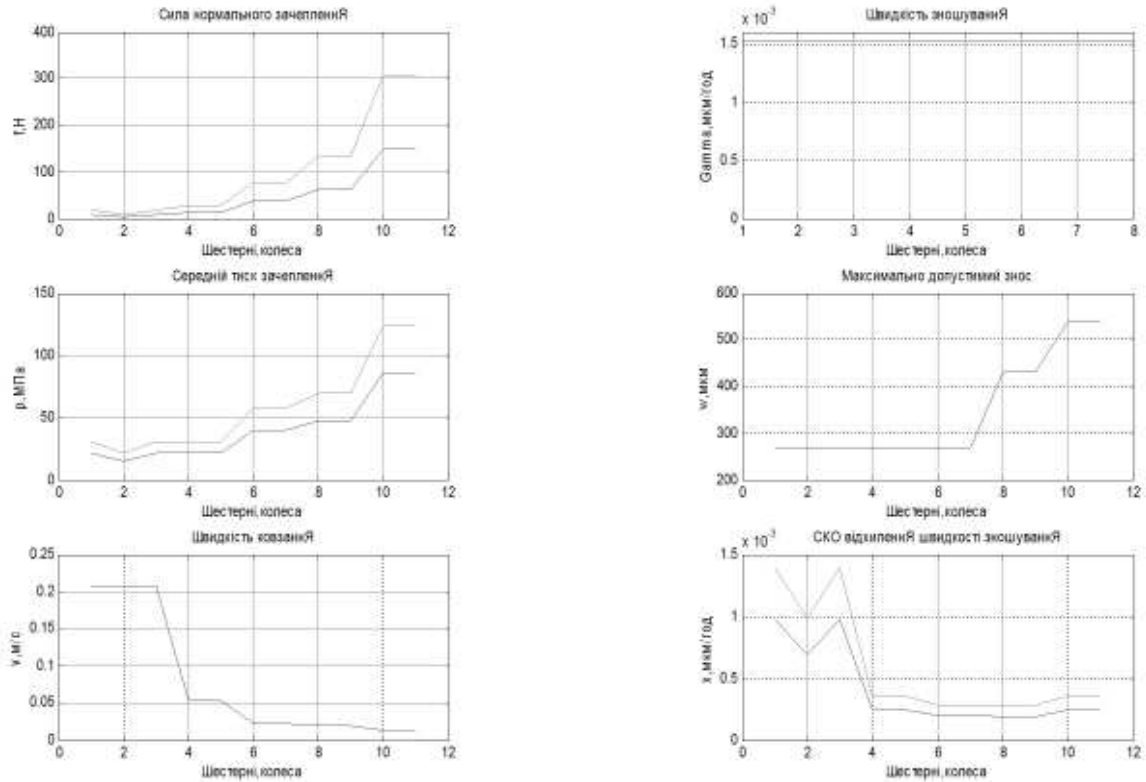


Рис. 4. Результати обробки отриманих даних

На осі ординат — визначення імовірності безвідмовної роботи редуктора ПСБ-ВБР, на осі абсцис — термін експлуатації ПСБ. Розглядаються варіанти з авторським методом оцінки надійності та базовий метод.

На рис. 3 представлено графік зміни імовірності безвідмовної роботи від терміну експлуатації для кожного зубчатого колеса з 20 коліс редуктора. Цифри 1 відповідає надійність першого зубчатого колеса, а саме — найнижчий графік, далі зображено ймовірність безвідмовної роботи зубчатих коліс за порядком їх зростання знизу вверх від першого зубчатого колеса.

На рис. 4 представлено, зокрема, графіки зміни сили нормального зачеплення, сили тиску зачеплення, швидкості зношування, ковзання для кожного ступеня редуктора. Отримані результати використовувались для перевірки зубів останнього ступеня на згин.

Крім того, їх аналіз був необхідний для розробки рекомендацій щодо підвищення надійності ПСБ:

1. Застосування більш зносостійких матеріалів зубчатих коліс редуктора та струмозмінача.

2. Можливе забезпечення дублювання високошвидкісних ступенів редуктора, де знос особливо інтенсивний. Тим більше, що для великогабаритних КА нерідко для надійності застосовують два привідних двигуна.

3. Застосування редукторів з більшим передаточним числом.

4. Застосування такого конструктиву зубчатих коліс останніх ступенів редуктора, що забезпечує зменшення сили нормального зачеплення.

5. Розробка та реалізація заходів, що забезпечують захист вуглепластикових каркасів панелей СБ від впливу ФКП.

## Висновки

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

2. Запропонований метод дозволяє підвищити точність оцінки надійності безвідмовної роботи ПСБ з довготривалим терміном активного існування в середньому на 8 процентів.

3. Розроблений метод оцінки ймовірності безвідмовної роботи ПСБ можна використати для прогнозування ймовірності безвідмовної роботи інших бортових агрегатів КА ДЗЗ, перш за все спецпанелей та радіолокаторів.

## 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. *Слюдинов М. Н.* Надежность и точность механизмов приводов систем управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1984. — 350 с.

5. *Шатихин В. Е., Семенов Л. П., Хорошилов В. С., Попель В. М., Костенко Г. А.* Врахування зносу зубчатих передач при оцінюванні динамічних харак-

теристик приводу сонячних батарей // Космічна наука і технологія, Київ. 2006 — т. 12, № 4, — С. 33–37.

6. *Шувалов В. А., Коцубей 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.

**СОВЕЩАНИЕ АКТИВА РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ  
«МЕЖДУНАРОДНАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ CALS-ТЕХНОЛОГИИ.  
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»**

Московское представительство ОАО «КнААПО им. Ю. А. Гагарина»

23 июня 2011 г.

**Участники совещания:**

- *Братухин А. Г.* — главный редактор, д. т. н., профессор, International Expert in Aerospace and CALS
- *Лавёров Н. П.* — рецензент, д. т. н., профессор, академик РАН
- *Гуляев Ю. В.* — рецензент, д. т. н., профессор, академик РАН, член Президиума РАН
- *Каторгин Б. И.* — рецензент, д. т. н., профессор, академик РАН — Генеральный конструктор ОАО «НПО „Энергомаш“ имени академика В. П. Глушко»
- *Погосян М. А.* — рецензент, д. т. н., профессор, член-корр. РАН — Первый вице-президент ОАК, Генеральный директор Авиационной компании «Сухой», Генеральный директор — Генеральный конструктор компании «РСК „МиГ“»
- *Сироткин О. С.* — д. т. н., профессор, член-корр. РАН, директор издательства Энциклопедии, Генеральный директор ОАО «НИАТ»
- *Алифанов О. М.* — д. т. н., профессор, член-корр. РАН
- *Дмитриев В. Г.* — д. т. н., профессор, член-корр. РАН, вице-президент ОАО «НПК „Иркут“»
- *Медведев А. А.* — д. т. н., профессор — вице-президент ОАО «НПК „Иркут“»
- *Пекариш А. И.* — к. т. н., Генеральный директор ОАО «КнААПО им. Ю. А. Гагарина»
- *Огарков С. О.* — Первый заместитель Генерального директора ОАО «КнААПО им. Ю. А. Гагарина»
- *Савельевских Е. П.* — директор проектно-исследовательского научного центра ОАО «ОКБ Сухого»
- *Стрелец Д. Н.* — к. т. н., заместитель начальника научно-исследовательского отдела ОАО «ОКБ Сухого»
- *Харин А. А.* — д. т. н., профессор, ректор РГУИТП
- *Соколов В. П.* — д. т. н., профессор, проректор РГУИТП
- *Новиков А. С.* — д. т. н., профессор, Генеральный директор ОАО «ММП им. Чернышева»
- *Носков А. А.* — к. т. н., профессор, заместитель Генерального директора ОАО «ММП им. Чернышева»
- *Егоров В. Н.* — ответственный секретарь редакционной коллегии Энциклопедии, д. т. н., профессор, Ученый секретарь Совета НИАТ
- *Кривов Г. А.* — д. т. н., профессор, председатель правления АО «Украинский НИИ авиационной технологии» (Киев, Украина)
- *Матвиенко В. А.* — к. т. н., заместитель директора АО «Украинский НИИ авиационной технологии» (Киев, Украина)
- *Зворыкин К. О.* — к. т. н., доцент, руководитель отдела АО «Украинский НИИ авиационной технологии» (Киев, Украина)

- *Халфун Л. М.* — к. т. н., Генеральный директор ОАО «МПО им. И. Румянцева»
- *Паилов Б. М.* — Генеральный директор и Председатель правления ОАО «АВЭКС»
- *Норенков И. П.* — д. т. н., профессор, зав. кафедрой МГТУ им. Н. Э. Баумана
- *Яновский Л. С.* — д. т. н., профессор, начальник отдела ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»
- *Клочков В. В.* — к. т. н., д. э. н., профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, профессор МАИ
- *Тихомирова Н. В.* — руководитель издательства «Медиа-Космос»
- *Конорский Н. С.* — к. т. н., начальник Московского представительства ОАО «КнААПО им. Ю. А. Гагарина»
- *Кумалагова Н. Я.* — заместитель главного редактора научно-технического журнала «Наука и технологии в промышленности» и др.

**Решение совещания:**

1. Отметить актуальность создания Энциклопедии, изложенную в рецензиях академика РАН *Лавёрова Н. П.*, академика РАН *Гуляева Ю. В.*, академика РАН *Каторгина Б. И.*, член-корреспондента РАН *Погосяна М. А.*
2. Выразить благодарность за поддержку издания Энциклопедии Национальному институту авиационных технологий (Генеральный директор член-корр. РАН *Сироткин О. С.*), Авиационной компании «Сухой» (Генеральный директор член-корр. РАН *Погосян М. А.*), Комсомольск-на-Амуре авиационному производственному объединению имени Ю. А. Гагарина (Генеральный директор к. т. н. *Пекариш А. И.*), Московскому машиностроительному предприятию имени В. В. Чернышова (Генеральный директор д. т. н., профессор *Новиков А. С.*), Иркутскому авиационному заводу — филиалу НПК «Иркут» (Генеральный директор к. т. н. *Вепрев А. А.*), Обнинскому научно-производственному предприятию «Технология» (Генеральный директор д. т. н., профессор *Викунин В. В.*), Акционерному обществу «АВЭКС» (директор *Паилов Б. М.*), Московскому производственному объединению имени И. Румянцева (Генеральный директор к. т. н. *Халфун Л. М.*).
3. Согласовать не включение в содержание Энциклопедии ряда статей специалистов ФГУП ММП «Салют» и НПК «Иркут».