

В. П. Фриз, П. В. Фриз, О. Р. Рихальський, О. Л. Поляков

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ПОТЕНЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОГНОЗУЮЧОГО КОНТРОЛЮ В СИСТЕМАХ ОБСЛУГОВУВАННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Проводиться аналіз можливостей удосконалення прийнятої системи обслуговування (СО) космічних апаратів (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) на етапі їх цільового застосування за рахунок підвищення апостеріорної імовірності безвідмовної роботи (ІБР) бортових систем (БС). Наведено методику оцінювання потенційних можливостей прогнозуючого контролю (ПК) БС. Здійснено порівняльний аналіз потенційних можливостей контролю працездатності (КП) та ПК при стратегії обслуговуванні КА з відбраковуванням.

Постановка проблеми. КА як носії бортової цільової апаратури у складі космічних інформаційних систем відіграють основну роль у забезпеченні високої ефективності виконання цільових завдань цими системами. У той же час, обмежена надійність БС та недосконала технологія їх обслуговування в орбітальному польоті разом з іншими факторами можуть знижувати ефективність функціонування таких систем [1, 2].

При цьому під обслуговуванням КА розуміють сукупність операцій контролю технічного стану (ТС) БС та відновлення їх працездатності, а під СО – сукупність відповідних технічних і програмних засобів орбітального та наземного базування, а також спеціально підготовленого обслуговуючого персоналу. Стосовно контролю ТС зазначимо, що в існуючій СО здебільшого застосовують такі види контролю:

а) функціональний (ФК) – контроль правильності функціонування КА тільки в одному із можливих режимів роботи;

б) контроль працездатності (КП) – контроль правильності функціонування КА в усіх передбачених режимах роботи;

в) діагностичний (ДК) – контроль з метою виявлення місця та причин відмови БС.

У той же час, прогнозуючий контроль – контроль з метою визначення поточного і майбутнього ТС – у практиці експлуатації КА поки не знайшов застосування, хоча він є одним із найбільш інформативних у порівнянні з ФК та КП [3, 4].

Одним із факторів, що негативно впливають на якість обслуговування КА інформаційних систем, у тому числі й ДЗЗ, є існуюча однопунктна технологія управління вітчизняними КА, при якій об'єктивно обмежується час на їх контроль та відновлення працездатності. Наприклад, згідно з типовою добовою циклограмою роботи перспективних КА “Січ-2” [5] телеметричний контроль БС та передача командної інформації на КА передбачена лише на першому, шостому та чотирнадцятому витках і

лише, що цілком природно, під час знаходження КА в зоні радіовидимості наземних засобів (протягом 10–15 хв.).

У зв'язку з цим на нинішньому етапі необхідно приділяти значну увагу теоретичним і прикладним дослідженням на етапах створення та експлуатації КА, спрямованих на підвищення характеристик надійності БС та вдосконалення їх СО. При цьому основними напрямками вдосконалення прийнятої СО КА на етапі їх цільового застосування можуть бути підвищення [6]:

- а) коефіцієнта готовності КА за рахунок скорочення часу на їх обслуговування;
- б) апостеріорної ІБР КА на основі ПК.

Огляд останніх досліджень і публікацій. У загальному випадку з огляду на проблему підвищення апостеріорної ІБР об'єктів за результатами ПК використовують здебільшого дві стратегії обслуговування [3, 4]:

- а) з відбракуванням (бракування та вилучення з експлуатації визнаних непридатними об'єктів);
- б) із заміною (відновлення визнаних непридатними об'єктів заміною на заздалегідь відомі).

При цьому під *придатними* розуміють такі об'єкти, які працездатні в момент контролю і не відмовлять протягом інтервалу θ , під яким розуміють тривалість застосування, період обертання КА, добовий цикл, гарантійний ресурс і т.п. Відповідно до цього під *непридатними* слід вважати такі об'єкти, які хоча і працездатні в момент контролю, але відмовлять протягом інтервалу θ .

Якщо припустити, що ці стратегії можна застосовувати на етапі експлуатації КА, то викликає інтерес кількісна оцінка виграшу в апостеріорній ІБР, який можна отримати за рахунок впровадження ПК у порівнянні з прийнятим КП.

Виходячи з цього, **метою статті** є вибір математичного апарату для розрахунків апостеріорної ІБР КА при КП і ПК та розробка методики оцінювання потенційних можливостей прогнозного контролю технічного стану КА.

Виклад основного матеріалу. Нехай технічний стан (ТС) КА в кожний момент часу характеризується вектором визначальних параметрів $\bar{X}(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Для значень цього вектора задана така допускова область G_0 , що умова $\bar{X}(t) \in G_0$ відповідає працездатному стану КА. З часом за рахунок старіння елементів БС, їх зносу, розрегулювання параметрів й інших причин вектор $\bar{X}(t)$ змінюється, утворюючи випадковий процес, який описує еволюцію ТС КА в ході їх експлуатації.

Припустимо, що процес $\bar{X}(t)$ статистично визначений на часовій осі при $t \geq t_0$, де t_0 – початок експлуатації КА на орбіті, та заданий момент контролю $t_k \geq t_0$. Інформація щодо ТС КА задається відрізком реалізації $X_n(t) \in G_0$, $t_0 \leq t \leq t_k$ випадкового процесу $\bar{X}(t)$, який описує минулі й поточні ТС КА (рис. 1).

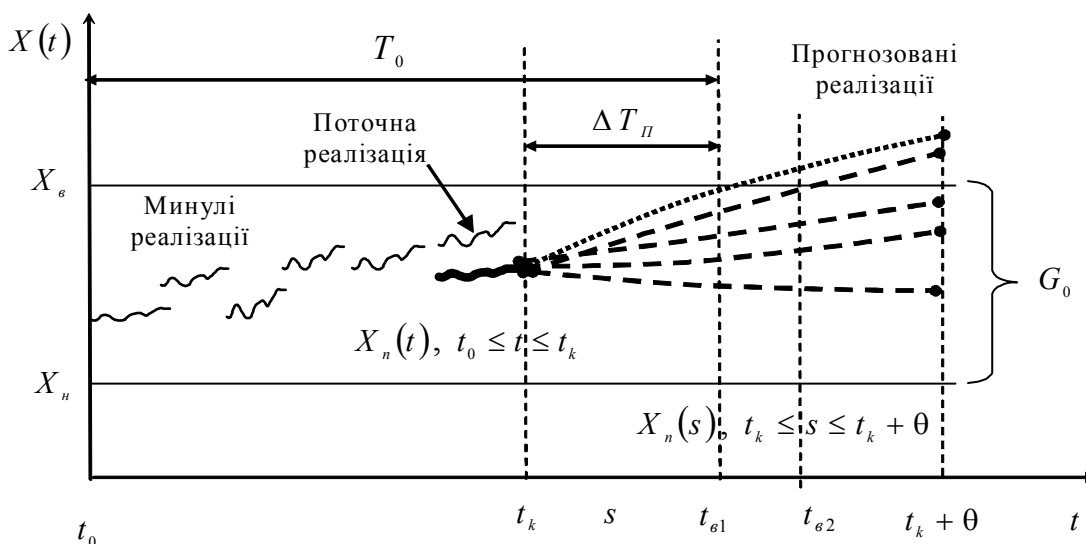


Рис. 1. Графік зміни випадкового процесу:

T_0 – напряцювання на відмову; ΔT_{II} – прогнозований інтервал безвідмовної роботи;

$X_в, X_н$ – верхній та нижній допуски на параметр

У цих умовах задача прогнозування ТС КА полягає у визначенні апостеріорного (умовного) закону розподілу часу до першого виходу процесу $\bar{X}(t)$ за межі допускової області G_0 відносно контрольованої реалізації $X_n(t)$, тобто як задача визначення умовної ІБР КА $P(t_k + \theta / t_k)$ – імовірності того, що КА не відмовить протягом деякого інтервалу часу θ за умови, що він був працездатним у момент контролю t_k .

При цьому контроль ТС БС здійснюється на інтервалах отримання телеметричної інформації (ТМІ), а діагностичний контроль – при порушеннях працездатності КА протягом сеансу прийому ТМІ та після нього аж до наступного сеансу зв'язку. Під моментом t_k слід розуміти час закінчення контролю працездатності БС та КА в цілому за ТМІ перед його застосуванням за призначенням.

Порівняння можливостей існуючого КП і запропонованого ПК зручно провести на основі моделі прийняття рішень за результатами цих видів контролю. Якщо вважати, що на момент контролю КА бортові й наземні засоби контролю перевірені та працездатні, то модель прийняття рішень при КП можна зобразити у вигляді графа [7] (рис. 2).

При цьому прийняті такі позначення:

Q – імовірність відмови КА до початку КП;

q – імовірність відмови КА в процесі контролю;

α та β_0 – умовна ймовірність помилок I та II роду (ризик виробника і користувача) відповідно;

ПР та НП – працездатний і непрацездатний стан КА;

ПП та ПВ – прийняті рішення про працездатний стан і відмову КА.

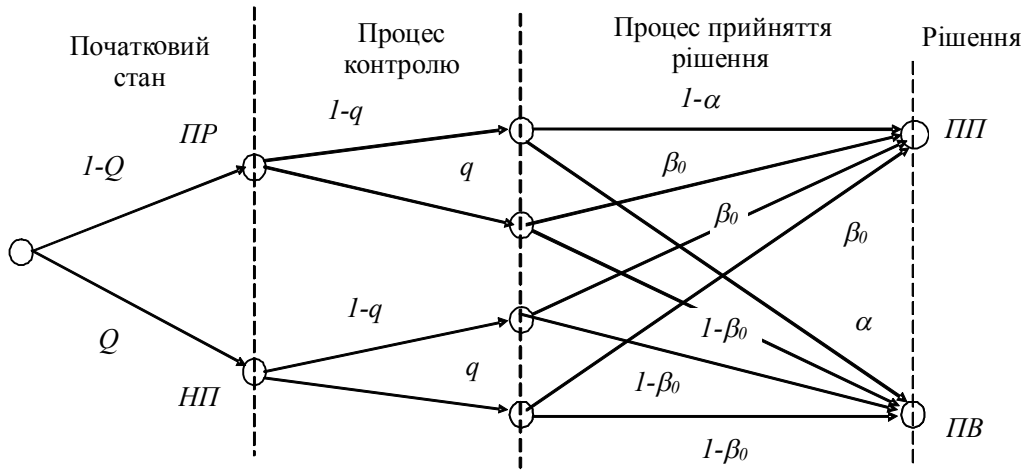


Рис. 2. Модель прийняття рішень при КП

Враховуючи те, що тривалість процесу КП мала і становить одиниці хвилин, можна прийняти ймовірність відмови КА за час контролю $q \approx 0$. Тоді граф КП можна спростити та зобразити (рис. 3), а апостеріорну ІБР КА визначити як

$$P_{КП}(s) = \frac{(1-Q)(1-\alpha)P_0(s)}{Q\beta_0 + (1-Q)(1-\alpha)} = \frac{1-Q}{1-Q(1-\gamma_0)} P_0(s), \quad (1)$$

де $P_0(s) = P(s) / K_r(t_k)$ – умовна функція надійності (ІБР) КА, працездатного в момент контролю t_k (рис. 4);

$P(s)$ – функція надійності КА на інтервалі $t_k < s < t_k + \theta$;

$K_r(t_k) = 1 - Q$ – коефіцієнт готовності КА в момент t_k ;

$\gamma_0 = \beta_0 / (1 - \alpha)$ – коефіцієнт недосконалості контролю КА, який відмовив.

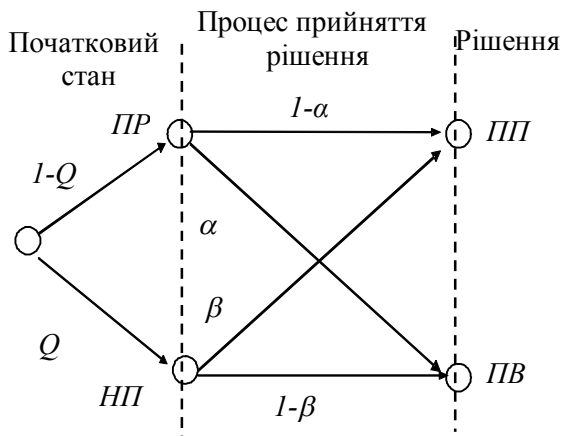


Рис. 3. Спрощена модель прийняття ІБР рішень при КП

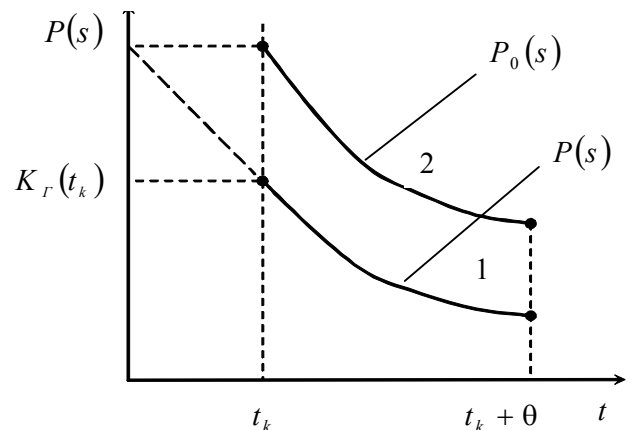


Рис. 4. Графік залежності апостеріорної КА від виду контролю

Для аналізу виразу (1) візьмемо $t_k = 0$ і розглянемо два граничних варіанти КП. По-перше, якщо КА допускається до роботи без контролю, то $\beta_0 = 1, \alpha = 0, \gamma_0 = 1$ і відповідно

$$P_{КП}(s) = (1-Q)P_0(s). \quad (2)$$

У даному випадку апостеріорна ІБР дорівнює апіорній (крива 1 на рис. 4).

По-друге, розглянемо ідеальний випадок, коли КП проводиться без похибок, що відповідає умові $\beta_0 = \alpha = 0$. Тоді апостеріорна ІБР КА

$$P_{\text{КП}}(s) = P_0(s). \quad (3)$$

Залежність (3) свідчить про границю досяжних результатів при КП (крива 2 на рис. 4).

Очевидно, що можливі реальні значення апостеріорної ІБР КА будуть знаходитись між кривими 1 і 2, причому верхня її границя досягається тільки за рахунок безпомилкового відбраковування КА, який відмовив до моменту t_k .

Для підвищення апостеріорної ІБР КА (досягнення його значень, що знаходяться над кривою 2) припустимо, що в СО введено ПК, на основі якого можна всі БС, які зарезервовані у складі КА, розділити на три категорії (замість двох при КП – працездатний і непрацездатний):

B – КА відмовив до моменту контролю t_k ;

НПр – КА непридатний до виконання задачі на інтервалі θ (той, який працездатний у момент t_k , але відмовить до моменту $t_k + \theta$);

Пр – придатний до виконання задачі (той, який працездатний у момент контролю t_k і не відмовить до моменту $t_k + \theta$).

Тоді модель прийняття рішення за результатами ПК можна зобразити на рис. 5, на якому введені додаткові позначення:

$P_0(\theta)$ – умовна ІБР КА в момент $s = \theta$ за умови, що він працездатний у момент контролю;

β_τ – умовна ймовірність помилок другого роду, що пов'язана з визнанням придатним фактично непридатного КА;

ППр та *ПВ* – визнання придатним та непридатним КА відповідно.

З урахуванням цього знайдемо ймовірності прийняття відповідних рішень:

$$\begin{aligned} P_{\text{ППр}} &= (1-Q)P_0(\theta)(1-\alpha) + (1-Q)[1-P_0(\theta)]\beta_\tau + Q\beta_0; \\ P_{\text{ПВ}} &= Q(1-\beta_0) + (1-Q)[1-P_0(\theta)](1-\beta_\tau) + (1-Q)P_0(\theta)\alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналіз формул (4) і рис. 5 показує, що через можливі похибки першого роду α та другого роду β_0 і β_τ в апостеріорній сукупності (після ПК) можуть знаходитись такі об'єкти:

1) КА, які фактично відмовили, але помилково залишені в експлуатації. Ймовірність наявності їх в апостеріорній сукупності

$$P_1 = \frac{Q\beta_0}{(1-Q)P_0(\theta)(1-\alpha) + (1-Q)[1-P_0(\theta)]\beta_\tau + Q\beta_0}, \quad (5)$$

а ІБР таких КА $P_1(s) = 0$;

2) КА, які фактично непридатні, але помилково залишені в експлуатації. Ймовірність наявності їх в апостеріорній сукупності

$$P_2 = \frac{(1-Q)[1-P_0(\theta)]\beta_\tau}{(1-Q)P_0(\theta)(1-\alpha) + (1-Q)[1-P_0(\theta)]\beta_\tau + Q\beta_0}, \quad (6)$$

а ІБР таких КА

$$P_2(s) = \begin{cases} \frac{P_0(s) - P_0(\theta)}{1 - P_0(\theta)}, & s < \theta; \\ 0, & s > \theta; \end{cases} \quad (7)$$

3) КА, які фактично придатні. Імовірність наявності їх в апостеріорній сукупності

$$P_3 = \frac{(1 - Q)P_0(\theta)(1 - \alpha)}{(1 - Q)P_0(\theta)(1 - \alpha) + (1 - Q)[1 - P_0(\theta)]\beta_\tau + Q\beta_0}, \quad (8)$$

ІБР таких КА

$$P_3(s) = \begin{cases} 1, & s \leq \theta; \\ P_0(s)/P_0(\theta), & s > \theta. \end{cases} \quad (9)$$

Тоді з урахуванням особливостей перерахованих категорій апостеріорна ІБР КА, що визнані придатними за результатами ПК, можна визначити як $P_{ПК} = P_2P_2(s) + P_3P_3(s)$ або з урахуванням виразів (6)-(9) після перетворень отримаємо:

$$P_{ПК} = \frac{(1 - Q)}{(1 - Q)[\gamma_\tau + (1 - \gamma_\tau) \cdot P_0(\theta)] + \gamma_0 \cdot Q} \cdot \begin{cases} \gamma_\tau P_0(s) + (1 - \gamma_\tau)P_0(\theta), & s \leq \theta; \\ P_0(s), & s > \theta, \end{cases} \quad (10)$$

де $\gamma_\tau = \beta_\tau / (1 - \alpha)$ – коефіцієнт недосконалості контролю КА, які непридатні.

За допомогою (10) можна (за аналогією з виразом (1) для КП) оцінити можливості ПК як засобу для підвищення апостеріорної ІБР КА, що обслуговуються з відбраковуванням.

Для цього достатньо розглянути два крайні випадки, один з яких відповідає максимально можливим ймовірностям помилок, а другий (ідеальний) – повній їх відсутності.

У першому випадку передбачається прийняття рішення щодо придатності КА без контролю. При цьому $\beta_0 = \beta_\tau = 1, \alpha = 0$, а коефіцієнт недосконалості контролю $\gamma_0 = \gamma_\tau = 1$. При підстановці отриманих значень у вираз (10) апостеріорна функція надійності трансформується в апіорну (2) і ніякого виграшу в надійності не досягається (крива 1 на рис. 6).

Другий крайній випадок відповідає ідеальному ПК (ПКІ). При цьому ймовірність помилок $\beta_0 = \beta_\tau = \alpha = 0$, звідки випливає, що $\gamma_0 = \gamma_\tau = 0$. Після підстановки цих значень у формулу (10) отримаємо апостеріорну ІБР визнаних придатними КА у випадку ПКІ (крива 3 на рис.6):

$$P_{ПКІ}(s) = \begin{cases} 1, & s \leq \theta; \\ P_0(s)/P_0(\theta), & s > \theta. \end{cases} \quad (11)$$

Проведений аналіз показує, що можливі реальні значення апостеріорної ІБР КА, що обслуговується при існуючому КП, знаходяться між кривими 1 і 2 (див. рис. 6), а при ПК – між кривими 1 і 3. Таким чином, ПК забезпечує виграш в апостеріорній ІБР КА, які обслуговуються. При цьому теоретично ПК здатен забезпечити на інтервалі θ ІБР, що дорівнює 1. Цей результат недосяжний навіть теоретично при будь-якому іншому виді контролю. У цьому разі він досягається завдяки повній відповідності між кінцевою метою обслуговування й алгоритмом ПК. У випадку ідеального ПК найбільш суттєво виражена його властивість збільшувати середній час безвідмовної роботи T_0 визнаних придатними КА.

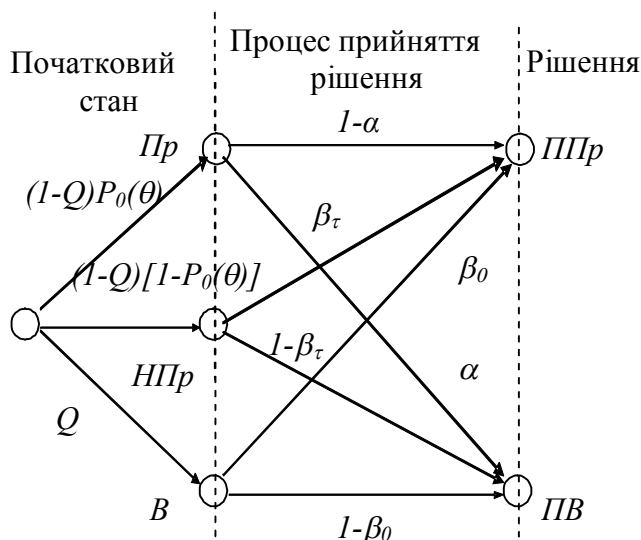


Рис. 5. Модель прийняття рішень за результатами ПК

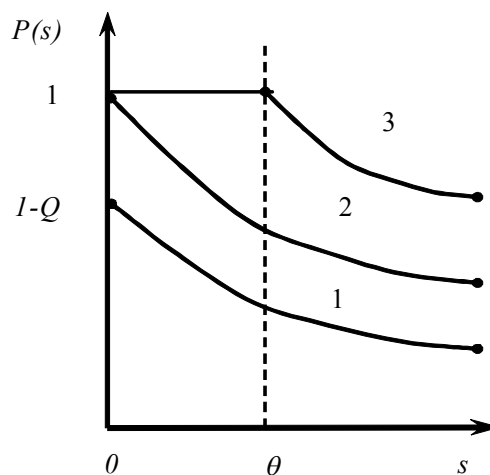


Рис. 6. Графік залежності апостеріорної ІБР пристрою КА

Наприклад, у випадку експоненціального закону розподілу, коли $P_0(s) = \exp(-s/T_0)$, при розрахунках середнього часу безвідмовної роботи отримаємо $T_{ПКІ} = \theta + T_0$ [8], що дає вигреш, який дорівнює θ .

Для кількісної оцінки апостеріорної ІБР КА при обслуговуванні КА ДЗЗ “Січ-2” для різних видів контролю скористаємось виразами (1) та (10). Залежності апостеріорної ІБР КА при середньому часі безвідмовної роботи $T_0 = 500$ год від тривалості інтервалу експлуатації наведені на рис. 7.

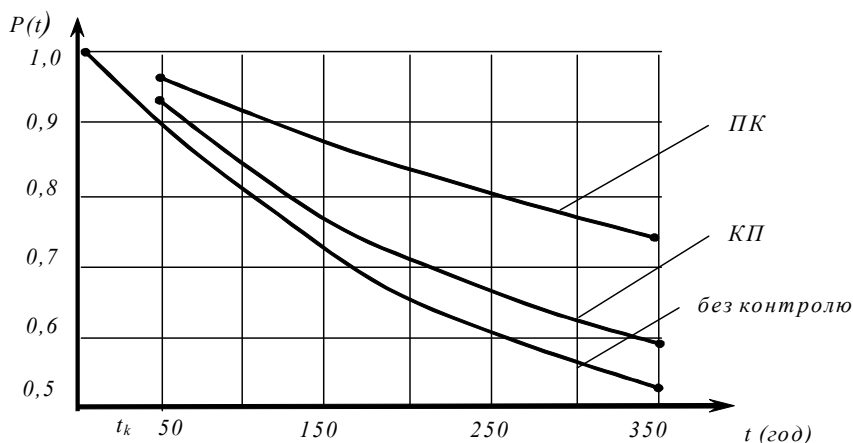


Рис. 7. Графік залежності ІБР КА при різних видах контролю КА

Розрахунок наведених залежностей проводився за умови, що $Q = 0,05$, $\alpha = 0,02$, $\beta_0 = 0,03$, $\beta_\tau = 0,03$. Як видно із рис. 7, ПК може забезпечити вигреш в апостеріорній ІБР у порівнянні з КП біля 15%.

Висновки. Таким чином, для підвищення апостеріорної ІБР КА необхідно перейти від традиційного контролю працездатності до прогнозуючого контролю БС і КА в цілому. При цьому замість поділу КА на працездатні й непрацездатні, який використовується при КП, ПК дозволяє розділити їх на три категорії: придатні, непридатні (хоча і працездатні) і непрацездатні.

У цьому випадку підвищення апостеріорної ІБР КА досягається за рахунок заміни серед них не тільки непрацездатних, але і непридатних до подальшої експлуатації. Порівняння різних видів контролю і відновлення КА показало, що при використанні ПК можна досягти суттєвого виграшу в апостеріорній ІБР КА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чернявский Г. И. Индивидуальный прогноз остаточного ресурса сложных технических систем по результатам эксплуатации / Г. И. Чернявский, Г. А. Беркетов, И. Д. Комаров // Двойные технологии. – 2005. – № 4. – С. 18–23.
2. Давыдов А. Е. Предложения по созданию автоматизированной системы прогнозирования надежности и остаточного ресурса КА длительного функционирования / А. Е. Давыдов, С. В. Ульянов, М. А. Лут // Двойные технологии. – 2003. – № 2. – С. 25–31.
3. Эксплуатация радиотехнических комплексов / [под ред. А. И. Александрова]. – М. : Сов. радио, 1976. – 208 с.
4. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры / [под ред. В. Ю. Лавриненко]. – [2-е изд.]. – М. : Высшая школа, 1978. – 320 с.
5. Космическая система оптико-электронного наблюдения Земли и связи «Січ-2». Аванпроект // Пояснительная записка: Часть 6. Космический аппарат МС-2-8 «Січ-2». ПЗ-6. – НКАУ : ГКБ «Южное», 2002. – № 3481/1. – 192 с.
6. Фриз П. В. Методика оцінки ефективності обслуговування космічних апаратів дистанційного зондування Землі / П. В. Фриз, О. В. Андреев, О. Р. Рихальський // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2008. – № 2 (45). – С. 18–23.
7. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский. – К. : Техніка, 1975. – 768 с.
8. Справочник по вероятностным расчетам / [Г. Г. Абергауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина]. – [2-е изд.]. – М. : Воениздат, 1970. – 536 с.

Подано 02.06.08

П. В. Фриз, В. П. Фриз, А. Р. Рыхальский, А. Л. Поляков
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В СИСТЕМАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проводится анализ возможностей усовершенствования принятой системы обслуживания космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли на этапе их целевого применения за счёт повышения апостериорной вероятности безотказной работы бортовых систем. Приведена методика оценки потенциальных возможностей прогнозирующего контроля бортовых систем. Осуществлен сравнительный анализ потенциальных возможностей контроля работоспособности и прогнозирующего контроля при стратегии обслуживания КА с отбраковыванием.

P. V. Friz, V. P. Friz, A. R. Rihalsky, A. L. Polyakov
TECHNIQUE OF AN ESTIMATION OF POTENTIAL OPPORTUNITIES OF THE
PREDICTING CONTROL IN THE SYSTEMS OF SPACE VEHICLES SERVICE

The analysis of the accepted system of space vehicles service of remote sounding of the Earth is carried out. The ways of perfection of system of space vehicles service at a stage of their target application are determined. The technique of an estimation of potential opportunities of the predicting control of onboard systems is given which raises conditional probability of non-failure operation of onboard systems. The comparative analysis of potential opportunities of the control of serviceability and predicting control is carried out.