

УДК 004.942

І. В. ПУЛЕКО,

кандидат технічних наук, доцент
(Житомирський військовий інститут
ім. С. П. Корольова)

Інформаційна технологія оперативного контролю стану малого літального апарата на основі часового подання вимірювальної інформації

Розроблена інформаційна технологія оцінки технічного стану малого літального апарата, що базується на основі подання вимірів параметрів контролю часовими інтервалами.

Разработана информационная технология оценки технического состояния малого летательного аппарата, которая базируется на основе представления измерений параметров контроля временными интервалами.

Світова тенденція до мікромініатюризації і застосування нанотехнологій у складних технічних системах привела до появи нових класів апаратів, таких як: безпілотні літальні апарати класів «міні» та «мікро» у авіаційних системах; мікро- нано- та пікосупутники в космічних системах; міні- мікро- нанороботи в робототехнічних системах [1–5]. З погляду теорії управління ці технічні системи об'єднує те, що об'єктом керування тут виступає малий динамічний апарат, який функціонує в певному середовищі і, як правило, знаходиться на великій відстані від системи керування. Характерними рисами таких апаратів є:

досить жорсткі ресурсні обмеження на масу, габарити, енергоресурси, що впливають на надійність (мале резервування) і живучість апаратів;

віддаленість від системи керування, що потребує високої автономності та інтелектуалізації бортового комплексу керування (БКК) і передбачає оцінку технічного стану та параметрів руху на борту апарата.

Оцінка технічного стану, а у багатьох випадках і параметрів руху таких апаратів, покладається на бортові інформаційно-телеметричні системи (БІТС). Забезпечення автономності та інтелектуалізація БКК висувають вимоги до БІТС малих апаратів щодо виконання бортового автоматичного контролю стану для здійснення оперативного керування.

Таким чином, для малих апаратів виникає нагальна потреба в розробці бортових систем та інформаційних технологій автоматичного контролю стану апарата, які б не вимагали великих обчислювальних ресурсів і енергетичних витрат.

Огляд останніх досліджень і публікацій показує, що інтелектуальні БІТС будуються за модульним принципом на сучасній елементній базі та дозволяють вимірювати велику кількість різних за фізичною природою телеметричних параметрів [1–5].

Проведені успішні експерименти із застосування нових фізичних принципів вимірювання в БІТС, зокрема концепції використання часових інтервалів як універсальної вимірювальної величини при виконанні процедур вимірювання значень інших фізичних величин, свідчать, що можливо суттєво покращити метрологічні, енергетичні і експлуатаційні характеристики БІТС [6–10]. Тому доцільним є подальший розвиток концепції використання часових інтервалів як універсальної вимірювальної величини для створення технологій оперативного контролю стану апаратів.

Основним завданням даної роботи є розробка технології оперативного контролю стану малого літального апарата на основі часового подання вимірювальної інформації.

З погляду теорії управління, оцінка стану літального апарата в польоті відіграє роль зворотного зв'язку, за допомогою якого оцінюється відповідність стану ЛА як об'єкта керування плановому на певний момент часу. Так, для застосування за цільовим призначенням ЛА необхідно послідовно управляти його апаратурою для переведення в задані стани. Для управління справним об'єктом необхідно за допомогою засобів і методів

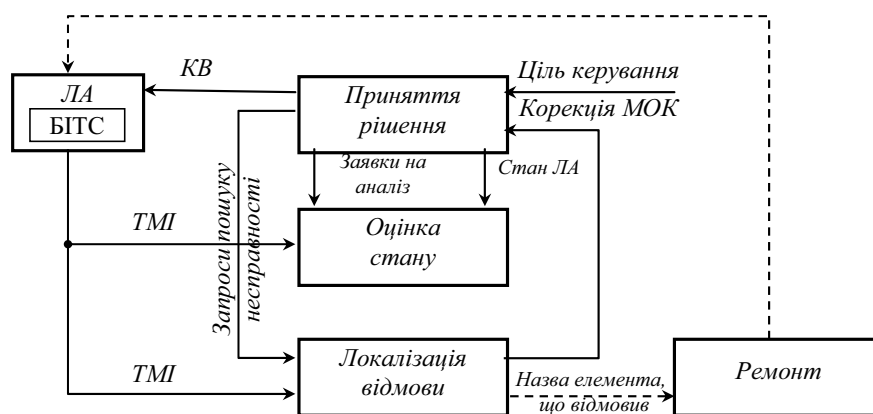


Рис. 1. Типова послідовність дій при управлінні

ідентифікації отримати модель його поведінки. За цією моделлю, знаючи стан на даний момент часу і цільовий стан, можна визначати послідовність керувальних впливів (KB), реалізація якої забезпечує досягнення цільового стану. Таку модель управління об'єктом називають моделлю оперативного керування (МОК) [2], а завдання визначення послідовності дій, що управляють, – завданням керування апаратурою (рис. 1).

У процесі керування поточний стан ЛА, що визначається системою оцінки стану, періодично порівнюється з прогнозованим станом за МОК. Незбіжність цих станів означає перехід до нештатного управління ЛА і необхідності локалізації відмови. Після корекції моделі керування або відновлення об'єкта (ремонт) знов може здійснюватися штатне керування об'єктом.

Аналіз поточного стану малих літальних апаратів може проводитись шляхом здійснення оперативного контролю за допомогою автоматизованої системи контролю на борту. Оскільки малі ЛА мають обмеження за масовими, габаритними й енергетичними показниками, це обмежує їх обчислювальні ресурси, і тому повне вирішення оптимізаційних та статистичних задач на борту поки що неможливе. Тому контроль функціонування характеризує поведінку об'єкта в даному стані в нинішній момент часу і полягає в перевірці виконання об'єктом своїх функцій без їх повної кількісної оцінки, що для даного випадку являє собою контроль працездатності.

Контроль працездатності [1] – це допусковий або кількісний контроль параметрів з метою визначення працездатності системи: чи придатна вона для виконання своїх функцій. У даному виді контролю використовуються результати вимірювань параметрів, що характеризують роботу системи.

У сучасній техніці найбільшого застосування отримали чотири схеми контролю [1], що визначають алгоритм контролю і залежать від прийнятої моделі об'єкта контролю.

Перша схема контролю передбачає, що стан системи визначається сукупністю параметрів. Якщо параметри знаходяться в межах допусків, то система вважається працездатною. При виході хоч би одного параметра за межі допуску система стає непрацездатною. За цією

схемою вимірюються значення параметрів, порівнюються з допусками щодо номінальних значень і застосовується логічна схема І.

Друга схема передбачає, що моделлю системи як об'єкта контролю є сукупність параметрів, функціонально зв'язаних між собою через показник якості роботи. Знаходження показника якості в полі певного допуску щодо номінального значення забезпечує виконання системою поставлених завдань. За цією схемою проводиться вимірювання параметрів, обчислюється функціонально пов'язаний з параметрами показник якості, порівнюється із значенням, відповідним номінальним значенням параметрів.

Третя схема контролю передбачає, що показник якості визначається як функціонал від спостережуваних вихідних сигналів реальної і ідеальної систем. Залежність показника якості від параметрів невідома. За спостереженнями вихідних сигналів реальної і ідеальної систем формується оцінка показника якості. Далі отримана оцінка порівнюється з контрольними допусками і ухвалюється рішення про працездатність системи.

Перша і друга схеми контролю разом з оцінкою працездатності системи забезпечують рішення задачі діагностики.

Четверта схема здійснює контроль функціонування системи. За наслідками вимірювань сигнальних або діапазонних параметрів складається індикаторний осередок, що характеризує стан параметрів. Отриманий осередок порівнюється з контрольним осередком, зміст якого дає уявлення про дійсну картину положення датчиків при даному режимі роботи системи.

На відміну від класичної структури БІТС, у вимірювальних каналах яких вимірюваний сигнал, як правило, визначається амплітудною зміною вихідного сигналу, що, відповідно, потребує застосування аналого-цифрового перетворення миттєвого значення напруги і апіорі передбачає виникнення пов'язаних з цим проблем, зокрема необхідності використання високостабільних джерел опорної напруги та струму, якісних підсилювачів та ретельного екранування вхідних кіл, у запропонованому підході пропонується здійснювати вимірювання значення вимірюваних фізичних величин шляхом визначення змін у тривалості на заданому рівні амплітуди

спеціальних імпульсних тестових сигналів (ІТС). Ці сигнали подаються на вхід живлення вимірювальної схеми та знімаються з її виходу. Таким чином, відпадає необхідність у забезпеченні постійного і високоякісного живлення вимірювальної схеми. Вхідні ІТС будуть одночасно виконувати енергетичну функцію живлення датчика і забезпечуватимуть формування вихідних імпульсних сигналів, у яких внаслідок дії вимірюваних фізичних величин спостерігатиметься зміна часової тривалості, яка буде вимірюватися наперед визначеному рівні [7–10].

Введемо до складу бортових систем додатково дві моделі:

модель допусків на часові параметри затримок сигналів, що є аналогом допусків на телеметричні параметри;

модель оперативного керування, що є прогнозованою функцією часу, команд керування та поточного стану ЛА.

Принциповою відмінністю від інших моделей подібного типу є те, що в цих моделях їхні складові подані у вигляді значень часових інтервалів, які характеризують телеметричні параметри, їх допуски та реакцію системи на команди керування. Такі моделі розраховуються перед польотами за апіорними даними про вимірювані фізичні величини і алгоритми функціонування ЛА при подачі команд керування та можуть бути записані в бортові запам'ятовуючі пристрої.

Тут і далі у цій статті будемо вважати, що БКК автоматично виконує функції підтримання стабільності польоту (реалізує основні функції автопілота). Тобто команди керування будуть направлені на перемикання фіксованих режимів роботи бортових систем та введення координат точок у просторі, до яких необхідно перемістити ЛА. Тоді формально інформаційну технологію

контролю стану, що реалізується в БКК з часовим поданням вимірювальної інформації, можна представити у вигляді, показаному на рис. 2.

$$s(t) = x(t) + \varepsilon(t); \quad (1)$$

сигнал $s(t)$ розподілений за нормальним законом з математичним сподіванням m_s і дисперсією D_s .

За критерій оптимальності приймемо умову мінімуму вірогідності прийняття помилкового рішення.

Побудуємо правило вибору рішень про знаходження параметра в полі допуску або поза ним. У такій постановці можливі дві гіпотези: перша – параметр в полі допуску і друга – параметр поза полем допуску. Правило рішення подамо відношенням правдоподібності

$$\Lambda(s) = \frac{p(s)}{1 - p(s)}, \quad (2)$$

де $p(s)$ – апостеріорна вірогідність першої гіпотези.

Тоді апостеріорна вірогідність знаходження параметра в полі допуску визначається як

$$p(s) = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} \phi(x/s) ds, \quad (3)$$

де $\phi(x/s)$ – щільність імовірності, Δ_1, Δ_2 – відповідно нижнє і верхнє поля допуску.

При нормальному законі розподілу

$$\phi(x/s) = \frac{1}{\sqrt{\pi D_s}} \exp \left[-\frac{(x - m_s)^2}{2 D_s} \right]. \quad (4)$$

Підставляючи рівність (4) у вираз (3) і виконуючи інтеграцію, отримуємо

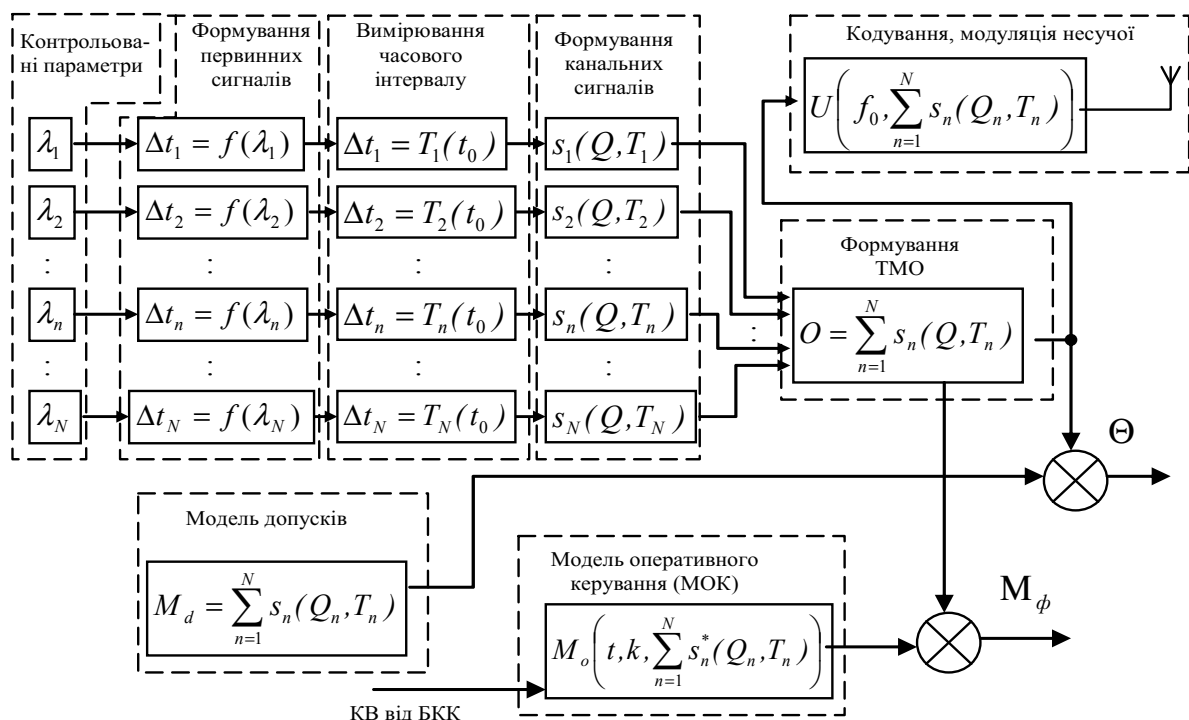


Рис. 2. Інформаційні процеси, що відбуваються в БІТС з часовим поданням вимірювальної інформації

$$p(s) = \Phi(\bar{\Delta}_2 - \bar{m}_s) - \Phi(\bar{\Delta}_1 - \bar{m}_s). \quad (5)$$

де $\bar{\Delta}_1 = \frac{\Delta_1}{\sigma_s}$, $\bar{\Delta}_2 = \frac{\Delta_2}{\sigma_s}$ – відносні допуски; $\bar{m}_s = \frac{m_s}{\sigma_s}$.

Відношення правдоподібності запишеться тепер у вигляді

$$\Lambda(s) = \frac{\Phi(\bar{\Delta}_2 - \bar{m}_s) - \Phi(\bar{\Delta}_1 - \bar{m}_s)}{1 - \Phi(\bar{\Delta}_2 - \bar{m}_s) + \Phi(\bar{\Delta}_1 - \bar{m}_s)}. \quad (6)$$

Тоді правило прийняття рішення сформулюємо таким чином: якщо $\Lambda(s) \geq 1$, то приймається рішення про знаходження параметра в полі допуску, якщо $\Lambda(s) < 1$, то параметр знаходиться поза полем допуску.

У формулі (6) $\bar{m}_s$ є апостеріорним математичним сподіванням. Для цілей контролю зручніше використовувати величину апіорного математичного сподівання і, відповідно, допуски відлічувати також від цієї величини. У цьому випадку в полі допуску може з'явитися асиметрія щодо апіорного математичного сподівання. Тому, за аналогією з [1], доцільно ввести коефіцієнт асиметрії поля допуску ν . Він змінюється від нуля до одиниці.

При симетричному щодо апіорного математичного сподівання полі допуску коефіцієнт асиметрії дорівнює одиниці. У результаті формула (6) запишеться в нових позначеннях:

$$\Lambda(s) = \frac{\Phi(\nu\bar{\Delta} - \bar{M}_s) + \Phi(\bar{\Delta} + \bar{M}_s)}{1 - \Phi(\nu\bar{\Delta} - \bar{M}_s) - \Phi(\bar{\Delta} + \bar{M}_s)}. \quad (7)$$

де $\bar{M}_s = m_s - m'_s$, $\nu\bar{\Delta} = \Delta_2 - m'_s$, $\bar{\Delta} = \Delta' - m'_s$; m'_s – апіорне математичне сподівання.

Для зменшення обчислювальної складності замість порівняння відношення правдоподібності (7) з одиницею можна порівнювати з 0,5 величину

$$\Lambda(\bar{M}_s) = \Phi(\nu\bar{\Delta} - \bar{M}_s) + \Phi(\bar{\Delta} + \bar{M}_s). \quad (8)$$

Еквівалентність цієї процедури можна перевірити діленням рівності (7) на її чисельник. Правило рішення в цьому випадку визначатиметься так: якщо $\Lambda(\bar{M}_s) \geq 0,5$, то параметр в полі допуску; якщо $\Lambda(\bar{M}_s) < 0,5$, то параметр поза полем допуску.

Це правило можна спростити, переходячи до безпосереднього порівняння оцінки параметра з деяким новим контрольним допуском. Величина контрольного допуску знаходиться з умови $\Lambda(\bar{M}_s) = 0,5$. Аналітично контрольні допуски визначаються за розв'язанням рівняння

$$\Phi(\nu\bar{\Delta} - \bar{\Delta}_{kon}) + \Phi(\bar{\Delta} - \bar{\Delta}_{kon}) = 0,5. \quad (9)$$

де $\bar{\Delta}_{kon}$ – контрольний допуск.

Для рішення практичних задач визначення контрольних допусків необхідно розв'язати рівняння (9) і побудувати залежності контрольних допусків від абсолютного допуску і коефіцієнтів асиметрії. На рис. 3 зображені криві для визначення відносних контрольних допусків як функцій відносних допусків і різних значень коефіцієнта асиметрії [1].

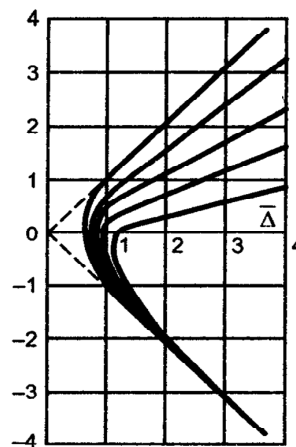


Рис. 3. Графіки відносних контрольних допусків

З рис. 3 можна зробити висновок, що при $\nu = 1$ контрольний допуск прямує до асимптоти – бісектриси координатного кута. При значній асиметрії поля допуску відносний контрольний допуск стає менше відносного допуску і поле допуску звужується.

Процедура ухвалення рішення «параметр в полі допуску або поза ним» є процесом порівняння оцінки параметра з контрольними допусками. Ухвалюється рішення «параметр в полі допуску», якщо його оцінка лежить усередині контрольних допусків, і «параметр поза полем допуску», якщо оцінка знаходиться поза контрольними допусками. Дана процедура ухвалення рішення забезпечує мінімум вірогідності помилкових рішень.

Працездатність системи по декількох параметрах визначається шляхом ухвалення рішення по кожному параметру за описаною схемою.

Для зручності автоматизації контролю сигналу, що не вийшов за межі допуску, присвоюється ознака «1», а що вийшов за нього – «0». Тоді правило оцінки працездатності Θ виглядає таким чином: якщо в результаті логічного множення виходить одиниця, то система працездатна, якщо нуль – непрацездатна.

Контроль функціонування систем здійснюється з використанням МОК, що розрахована заздалегідь на підставі програми роботи системи $M_i \left(t, k, \sum_{n=1}^N S_n^*(Q_n, T_n) \right)$.

У даному випадку пропонується подати МОК матрицею станів блоків системи при виконанні тієї або іншої операції згідно з програмою роботи. Число стовпців матриці дорівнює кількості блоків системи, а число рядків – числу запланованих операцій.

Кожен елемент матриці подається нулем або одиницею. Одиниця відповідає ввімкненому стану, а нуль – вимкненому. Тоді номер рядка є кодом операції. Сформована матриця зберігається в пам'ятовуючому пристрої автоматизованого комплексу обробки інформації. Виконання запланованих операцій проводиться за командами, що виробляються БКК. Команда подається кодом виконуваної операції.

Відповідно до програми роботи від системи БКК подаються команди (КВ) для виконання системою

запланованих операцій. Ця ж команда подається в пристрій пам'яті комплексу, де за її кодом обирається відповідний рядок матриці. Обраний рядок є моделлю системи при виконанні команди. За командою система виконує передбачену операцію. Система контролю проводить вимірювання контрольованих параметрів.

За наслідками контролю в ЕОМ комплексу формується образ стану системи О. Потім проводиться порівняння ТМО з обраним рядком матриці МОК. При збігу моделі й отриманого образу робиться висновок про нормальне функціонування системи. При незбігу хоч би одного елемента образу робиться висновок про ненормальне функціонування системи.

Висновки. Таким чином, розроблено інформаційну технологію оцінки технічного стану малого ЛА, що базується на основі подання вимірів параметрів контролю часовими інтервалами. За допомогою цієї технології одночасно можна здійснювати контроль стану та контроль функціонування систем ЛА без застосування складних обчислень.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Современная телеметрия в теории и на практике : учебн. курс / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, И. В. Шитов [и др.]. СПб. : Наука и техника, 2007. 672 с.
2. Управління космічними апаратами : підручн. / М. Ф. Пічугін, П. П. Топольницький, І. В. Пулеко [та ін.]. Житомир : ЖВІ НАУ, 2009. 280 с.
3. Блинов В. Н., Иванов Н. Н., Сеченов Ю. Н., Шалай В. В. Малые космические аппараты. Миниспутники. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов. Омск : ОмГТУ, 2010. 348 с.
4. Барановский А. М., Белозеров В. А., Опрышко Д. И. Комбинированная модель процесса оценивания достоверности контроля технического состояния космических аппаратов в условиях неопределенности. М. : Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 56–62.
5. Матюшин М. М. Оперативная оценка параметров состояния космического аппарата. 2011. URL: <http://www.i-mash.ru/materials/automation/15003-operativnaja-ocenka-parametrov-sostojaniya.html>.
6. Пулеко І. В., Рихальський О. Р., Павленко М. М., Андреев О. В. Алгоритм згладжування телеметричних параметрів космічних апаратів з використанням вейвлет-перетворення // Збірник наук. праць ЖВІРЕ. Житомир : ЖВІРЕ, 2006. С. 91–99.
7. Пулеко І. В. Визначення припустимої похибки обробки телеметричних вимірів. / Пулеко І. В., Рихальський О. Р., Топольницький П. П., Андреев О. В. // Збірник наукових праць ЖВІРЕ – Шабатура Ю. В., Пулеко І. В., Чумакевич В. О. / Теоретичні аспекти побудови телеметричних систем космічних апаратів з часовим представленням вимірювальної інформації // Військово-технічний зб. / Академія сухопутних військ. № 1 (4). Львів : АСВ, 2011. С. 43–49.
8. Шабатура Ю. В. Пулеко І. В., Чумакевич В. О. Теоретичні аспекти побудови телеметричних систем космічних апаратів з часовим представленням вимірювальної інформації // Військово-технічний зб. / Академія сухопутних військ. № 1(4). Львів : АСВ, 2011. С. 43–49.
9. Пулеко І. В., Шабатура Ю. В., Чумакевич В. О. Синтез радіотелеметричних комплексів космічних апаратів з часовим представленням інформації при мінімізації витрат // Військово-технічний зб. / Академія сухопутних військ. № 1(6). Львів : АСВ, 2012. С. 94–99.

Рецензент І. А. Пількевич, д-р техн. наук,
проф., заслужений діяч освіти України
(Житомирський військовий інститут
ім. С. П. Корольова)