УДК 629.735.017

НЕЧИПОРЕНКО О. М.

КРИТЕРІЙ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ РОБАСТНО СТІЙКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Пропонується нормувати час переходу САК з початку її функціонування до моменту втрати параметричної (робастної) стійкості *робастним критерієм її відмови*, який обмежує допустиме значення призначеного ресурсу САК при її проектуванні. Такий критерій дозволяє враховувати процеси фізичної деградації САК під час її експлуатації при нормуванні часу наступного підрегулювання (тривалості межремонтного періоду).

Time of transition of the automatic control system (ACS) from the beginning of its functioning to the moment of loss of self-reactance (robast) stability it is suggested to ration the robust criterion of its refuse which limits the assumed value of the appointed resource of ACS at its planning. Such criterion allows to take into account the processes of physical degradation of ACS during its exploitation at setting of norms of time of the subsequent subadjusting (durations of the TBO period).

1. Вступ

При аналізі надійності об’єкту або системи існують проблеми визначення моменту виникнення порушення (втрати) його працездатності – наробітку до відмови [1, 2, 3, 4] для нормування, наприклад, допустимого значення призначеного ресурсу САК при її проектуванні. Якщо процеси втрати працездатності САК (за рахунок зношування, старіння, утоми, зміни зовнішніх умов тощо) можна визначити функціональною залежністю її параметрів від часу, розглядають *параметричні* відмови (*параметричну надійність* САК).

Існують ймовірнісно-фізичні моделі наближення об’єкта до параметричної відмови [5]. Визначення розподілу наробітку до першої відмови об’єктів у такому випадку зводиться до вирішування завдання першого досягнення процесом граничного рівня і пов’язано з розв’язанням рівняння дифузії (Фоккера-Планка-Колмогорова), яке є диференціальним рівнянням у частинних похідних та під час розв’язування потребує встановлення *граничних умов* залежно від вигляду реалізацій процесу. У випадку втрати стійкості САК граничною умовою можна вважати момент досягнення межі її стійкості.

Новизна роботи полягає в поєднанні класичних показників безвідмовності технічних об’єктів з критерієм парамертичної стійкості САК: запропоновано використовувати критерій стійкості робастно стійкої системи як ***робастний критерій її відмови***. Такий критерій також дозволить враховувати процеси фізичної деградації САК під час її експлуатації при нормуванні часу наступного підрегулювання (тривалості межремонтного періоду).

В роботі поширено умову робастної стійкості на нестаціонарні системи і використано час виходу САК на межу стійкості як наробіток до її відмови.

2. Аналіз проблеми

Відомо, що при зміні визначального параметра [2] у часі і досягненні ним межі допуску виникає відмова об’єкта [2, 4]. Крім того, втрату стійкості системи можна розглядати як її відмову: нестійка система, яка знаходиться на межі (аперіодичної або коливальної) стійкості, не є працездатною: будь-яке незначне відхилення призводить до її відмови.

Якщо ситема параметрично нестійка, виникає проблема визначення меж її стійкості в залежності від значення визначального параметра (ВП). Задачу визначення меж параметричної стійкості в теорії автоматичного регулювання вирішує *критерій робастної стійкості системи*. Але цей критерій розглянуто тільки для стаціонарних систем [6]. З точки зору надійності, при знаходженні меж робастної стійкості системи необхідно врахо вувати ***час*** досягнення цієї межі визначальним параметром системи.

3. Постановка задачі

Параметри стаціонарних *робастно стійких* систем із часом у силу старіння або інших причин можуть мінятися, тобто такі системи можна розглядати як *квазі стаціонарні* або *неста-*

ціонарні. У подібних випадках виникає задача побудови систем керування таким чином, щоб вона була стійка не при одних фіксованих значеннях параметрів, а при всіх можливих їх значеннях.

Мета статті – представити параметри стаціонарної системи як функції часу і розглянути змінювання у часі *визначальних* параметрів САК. У даному випадку (гіпер)паралелепіпед Харитонова [6] буде мати вершини, що змінюються у часі. Момент часу, при якому умова робастної стійкості (всі поліноми Харитонова стійкі) не стане виконуватися, буде визначати момент виникнення відмови САК (наробіток системи до відмови), який пропонується розглядати, як критерій робастної стійкості системи.

4. Визначення параметричної надійності САК

Якщо відмова розглядається як вихід за припустимі межі значення параметра $A(t)$ об'єкта, що відбувається через зміни цього параметра у часі t (у загальному випадку у функції будь-якої монотонно зростаючої величини – наробітку), то ці відмови називають ***параметричними*** [2]. Надійність об'єкта у разі параметричних відмов визначається функціоналом деякого випадкового процесу $\{t\}$, який характеризує зміну параметрів об'єкта у часі. Об'єкт лишається працездатним, поки величина $A(t)$, що змінюється у часі, не досягає межі припустимої робочої області Ω.

Основний технічний параметр, який характеризує працездатність об'єкта і визначає його міру якості, називають ***визначальним параметром (ВП)***.

У загальному випадку ВП може бути вектором, тобто мати кілька складових. Граничні значення, які установлюються на кожен ВП об'єкта, є ***припустимими*** значеннями ВП, котрі обмежують ***робочу область (поле допуску)***, яку задають у НТД.

Поки значення векторного ВП об'єкта перебувають усередині багатовимірної робочої області, об'єкт вважають працездатним. Однак із часом під впливом факторів, пов'язаних зі старінням, зношуванням або розрегулюванням, кінець вектора $A(t)$ може досягти межі робочої області Ω. При цьому об'єкт втрачає працездатність (відбувається відмова).

У практиці експлуатації об'єкта більш важливо знати не щільність розподілу часу до відмови, а конкретний ***час збереження працездатності*** $t_{зб}$, протягом якого ВП досягає межі робочої області.

Для вирішення цієї задачі пропонується розглядати час втрати стійкості робастно стійкої САК як час досягнення ВП меж робочої області.

5. Робастна стійкість нестаціонарних САК

У разі старіння або інших необоротних причин у робастно стійких системах виникає необхідність побудови системи керування так, щоб вона була стійка не при одних фіксованих значеннях параметрів, а при всіх можливих їх значеннях, які функціонально змінюються у часі. У останньому випадку можна вважати систему *нестаціонарною*, а при плавних повільних змінах ВП у часі в межах робастної стійкості – стійкою.

Робастна стійкість САК визначається таким чином [6]. Характеристичний поліном САК $D(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \ldots + a_n$ називається *стійким поліномом* або *поліномом Гурвіця,* якщо всі його нулі є лівими.

Якщо позначити $(n+1)$-вектор $a = (a_0,\ a_1,\ \ldots,\ a_n)$ і в $(n+1)$-мірному просторі коефіцієнтів розглянути множину A ($A \subset R^{n+1}$), то поліном $D(\lambda)$ буде *робастно стійким* або *робастно стійким в множині A,* якщо він є стійким при будь-яких значеннях коефіцієнтів a_i $(i = 1,\ 2,\ \ldots,\ n)$ з множини A ($a \in A$).

Система буде *робастно стійкою* або *робастно стійкою на множині A,* якщо її характеристичний поліном є робастно стійким поліномом в A.

Для аналізу робастно стійких систем введено поліноми Харитонова [6].

Нехай множина A є (гіпер) паралелепіпедом:

$$A = \{\underline{a}:\ \underline{a}_i \le a_i \le \overline{a}_i,\ i = 0,\ 1,\ \ldots,\ n\}, \tag{1}$$

де $\underline{a}_i$ і $\overline{a}_i$ – мінімальне і максимальне значення коефіцієнта a_i $(i = 1,\ 2,\ \ldots,\ n)$.

Підставимо в характеристичний поліном $\lambda = j\omega$ і виділимо дійсну і уявну частини:

$$Q(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \ldots +$$
$$+ a_n = u(\omega) + j\upsilon(\omega),$$

$$u(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - a_{n-6}\omega^6 + \ldots, \tag{2a}$$

$$\upsilon(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - a_{n-7}\omega^7 + \dots \qquad (2б)$$

При фіксованому ω, коли вектор a пробігає всі значення з множини (1), характеристичний вектор описує прямокутник (рис. 1).

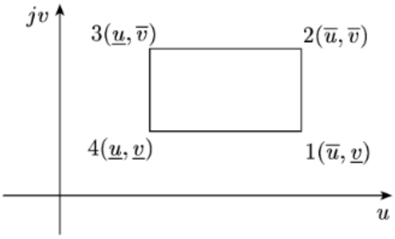

Рис. 1. Графік, що пояснює визначення поліномів Харитонова

Очевидно, що на вершинах прямокутника $u(\omega)$ і $\upsilon(\omega)$, як функції від a, приймають мінімальні або максимальні значення. На рис. 1 позначено мінімуми $u(\omega)$ і $\upsilon(\omega)$ – через $\underline{u}(\omega)$ і $\underline{\upsilon}(\omega)$, а максимуми – через $\overline{u}(\omega)$ і $\overline{\upsilon}(\omega)$ відповідно:

$$\underline{u} = \underline{u}(\omega) = \min_{a\in A} u(\omega), \quad \underline{\upsilon} = \underline{\upsilon}(\omega) = \min_{a\in A} \upsilon(\omega),$$
$$\overline{u} = \overline{u}(\omega) = \max_{a\in A} u(\omega), \quad \overline{\upsilon} = \overline{\upsilon}(\omega) = \max_{a\in A} \upsilon(\omega).$$

Функції $u(\omega)$ і $\upsilon(\omega)$ приймуть мінімальні значення, коли в (2а) і (2б) доданки з додатним знаком приймають мінімальні значення, а доданки з від'ємним знаком – максимальні значення. І навпаки, $u(\omega)$ і $\upsilon(\omega)$ приймуть максимальні значення, коли доданки з додатним знаком приймають максимальні значення, а доданки з від'ємним знаком – мінімальні. Тому з (2а) і (2б) маємо

$$\underline{u}(\omega) = \underline{a}_n - \overline{a}_{n-2}\omega^2 + \underline{a}_{n-4}\omega^4 - \overline{a}_{n-6}\omega^6 + \dots, \qquad (3а)$$
$$\underline{\upsilon}(\omega) = \underline{a}_{n-1}\omega - \overline{a}_{n-3}\omega^3 + \underline{a}_{n-5}\omega^5 - \overline{a}_{n-7}\omega^7 + \dots . \qquad (3б)$$
$$\overline{u}(\omega) = \overline{a}_n - \underline{a}_{n-2}\omega^2 + \overline{a}_{n-4}\omega^4 - \underline{a}_{n-6}\omega^6 + \dots, \qquad (3в)$$
$$\overline{\upsilon}(\omega) = \overline{a}_{n-1}\omega - \underline{a}_{n-3}\omega^3 + \overline{a}_{n-5}\omega^5 - \underline{a}_{n-7}\omega^7 + \dots . \qquad (3г)$$

Як випливає з рис. 1, вершинам прямокутника 1, 2, 3 і 4 відповідають характеристичні вектори

$$D_1(j\omega) = \overline{u}(\omega) + j\underline{\upsilon}(\omega), \quad D_2(j\omega) = \overline{u}(\omega) + j\overline{\upsilon}(\omega),$$
$$D_3(j\omega) = \underline{u}(\omega) + j\overline{\upsilon}(\omega), \quad D_4(j\omega) = \underline{u}(\omega) + j\underline{\upsilon}(\omega).$$

Підставивши у формулу для $D_1(j\omega)$ вирази для $\overline{u}(\omega)$ з (3в) і для $\underline{\upsilon}(\omega)$ з (3б), отримаємо

$$D_1(j\omega) = \overline{a}_n - \underline{a}_{n-2}\omega^2 + \overline{a}_{n-4}\omega^4 - \dots$$
$$\dots + j(\underline{a}_{n-1}\omega - \overline{a}_{n-3}\omega^3 + \underline{a}_{n-5}\omega^5 - \dots) = \overline{a}_n + \underline{a}_{n-1}(j\omega) +$$
$$\underline{a}_{n-2}(j\omega)^2 + \overline{a}_{n-3}(j\omega)^3 + \overline{a}_{n-4}(j\omega)^4 + \underline{a}_{n-5}\omega^5 + \dots .$$

Звідси, поклавши $j\omega = \lambda$, отримаємо характеристичний поліном $D_1(\lambda)$. Аналогічно можна отримати характеристичні поліноми, що відповідають решті вершин прямокутника.

Випишемо коефіцієнти при λ в порядку зростання степеня λ всіх чотирьох поліномів:

$$D_1(\lambda):\ \overline{a}_n,\ \underline{a}_{n-1},\ \underline{a}_{n-2},\ \overline{a}_{n-3},\ \overline{a}_{n-4},\ \underline{a}_{n-5},\ \dots, \qquad (4а)$$
$$D_2(\lambda):\ \overline{a}_n,\ \overline{a}_{n-1},\ \underline{a}_{n-2},\ \underline{a}_{n-3},\ \overline{a}_{n-4},\ \overline{a}_{n-5},\ \dots, \qquad (4б)$$
$$D_3(\lambda):\ \underline{a}_n,\ \overline{a}_{n-1},\ \overline{a}_{n-2},\ \underline{a}_{n-3},\ \underline{a}_{n-4},\ \overline{a}_{n-5},\ \dots, \qquad (4в)$$
$$D_4(\lambda):\ \underline{a}_n,\ \underline{a}_{n-1},\ \overline{a}_{n-2},\ \overline{a}_{n-3},\ \underline{a}_{n-4},\ \underline{a}_{n-5},\ \dots . \qquad (4г)$$

Поліноми $D_1(\lambda)$ $D_2(\lambda)$ $D_3(\lambda)$ і $D_4(\lambda)$ - поліноми Харитонова.

Необхідна умова робастної стійкості. Оскільки при робастній стійкості в паралелепіпеді (2) повинні бути стійкими характеристичні поліноми при всіх значеннях коефіцієнтів з цього паралелепіпеда, необхідно, щоб був стійким характеристичний поліном при $a_i = \underline{a}_i$ $(i = 1,\ 2,\ \dots,\ n)$. Тому для робастної стійкості в паралелепіпеді (2) необхідно, щоб при $\underline{a}_0 > 0$ виконувалися умови

$$\underline{a}_1 > 0,\ \underline{a}_2 > 0,\ \dots,\ \underline{a}_n > 0. \qquad (5)$$

Згідно теореми Харитонова, для того, щоб система з характеристичним поліномом $D(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_n$ *була робастно стійкою в паралелепіпеді*

$$A = \{\underline{a}:\ \underline{a}_i \le a_i \le \overline{a}_i,\ i = 0,\ 1,\ \dots,\ n\},$$

необхідно і достатньо, щоб всі поліноми Харитонова були стійкими.

Оскільки за визначенням робастної стійкості характеристичний поліном повинен бути стійким при всіх значеннях $a \in A$, то повинні бути стійкими і поліноми Харитонова як характеристичні поліноми, відповідні чотирьом різним значенням a з множини A. За критерієм Михайлова для робастної стійкості при $a_0 > 0$ достатньо, щоб годограф характеристичного вектора при будь-яких $a \in A$, почавшись на додатній дійсній піввісі, послідовно охоплював n квадрантів. Інакше кажучи, прямокутник на рис. 1 повинен послідовно охоплювати n квадрантів. Дійсна і уявна частини характеристичного вектора $D'(j\omega) = u'(\omega) + j\upsilon'(\omega)$, відповідного довільному $a' \in A$, задовольняє нерівностям

$$\underline{u}(\omega) \le u'(\omega) \le \overline{u}(\omega), \quad \underline{\upsilon}(\omega) \le \upsilon'(\omega) \le \overline{\upsilon}(\omega).$$

Тому, якщо вершини прямокутника послідовно охоплюють n квадрантів, то і всі точки прямокутника послідовно охоплюватимуть n квадрантів.

Для того, щоб система з характеристичним поліномом $D(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \ldots + a_n$ була робастно стійка в паралелепіпеді при виконанні необхідної умови робастної стійкості (5), необхідно і достатньо, щоб були стійкими:

а) у разі $n = 3$ поліном Харитонова $D_1(\lambda)$;

б) у разі $n = 4$ поліноми Харитонова $D_1(\lambda)$ і $D_2(\lambda)$;

в) у разі $n = 5$ поліноми Харитонова $D_1(\lambda)$, $D_2(\lambda)$ і $D_3(\lambda)$.

6. Робастний критерій відмови САК

Якщо при знаходженні меж робастної стійкості системи замість деякого значення ВП a_i множини параметрів *А* (див. вираз (1)) використовувати залежність цього параметра від часу $a_i(t)$, а потім розрахувати *час* досягнення цієї межі визначальним параметром САК, то таким чином можна отримати час $t_{\text{ãр}}$, що визначає наробіток системи до відмови.

Тривалість досягнення межі робастної стійкості при змінюванні ВП САК у часі можна розглядати як ***робастний критерій відмови системи*** $t_{\text{ãр}}$. Тоді (гіпер)паралелепіпед Харитонова [6] буде мати вершини, що змінюються у часі. Момент часу, при якому умови робастної стійкості (всі поліноми Харитонова стійкі) не стануть виконуватися, буде визначати момент виникнення відмови САК, який можна розглядати як критерій відмови.

Цей критерій можна використовувати для визначення впливу зміни одного з параметрів САК (наприклад, визначального) на її стійкість. Граничне значення ВП $a_{i\text{ãð}}$, після якого система стає нестійкою, і буде тим значенням досліджуваного параметра, при якому визначається значення часу $t_{\text{ãр}}$ (рис. 2).

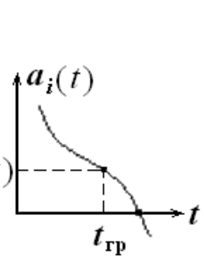

Рис. 2. Визначення граничного значення параметра $a_{i\text{ãр}}$***, яке знаходиться на межі стійкості системи***

7. Параметрична надійніть САК для випадкових змін ВП

Вище розглянуто випадок, коли змінювання ВП a_i у часі *детерміновані*. У загальній постановці завдання час досягнення ВП меж робочої області можна розглядати як систему *випадкових* величин або *векторний випадковий процес.*

Розглянемо характер випадкового процесу наближення до відмови на прикладі САК, працездатність якої визначається скалярним ВП *А* (однією координатою векторного ВП). При цьому простір ВП *А* буде одновимірним, а робоча область Ω обмежена відрізком прямої (граничне значення ВП $a_{\text{гр}}$). Нехай є множина $j = \overline{1, n}$ однакових САК, одночасно включених у роботу (за $t = 0$), і ВП кожної САК вимірюється у ті самі моменти часу t_i ($i = \overline{1, k}$).

Зміну ВП однакових САК у процесі експлуатації будемо розглядати як випадкову функцію часу $A(t)$. Для кожної *j*-ої САК ($j = \overline{1, n}$) зміна ВП є реалізацією (складовою) $A_j(t)$ випадкової функції $A(t)$. Точки перетину реалізацій $A_j(t)$ випадкового процесу із межею $A_{\text{ãð}}$ робочої області (поля допуску) відповідають моментам часу відмов *j*-их САК. Тому випадковий характер виникнення поступових відмов у процесі експлуатації однакових систем описується щільністю розподілу $f\{X(t)\}$ часу перетину ВП межі $A_{\text{ãð}}$, тобто щільністю розподілу часу до відмови.

Якщо з моменту включення в роботу (за $t = 0$), вимірюючи з однаковою $\Delta t = t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1}$ або різною періодичністю (інтервалом) Δt, контролювати значення ВП кожної j-ої САК, то можна прогнозувати (екстраполювати) подальші зміни ВП, а отже, передбачити момент настання відмови. Це дасть можливість організувати технічне обслуговування таких САК, тобто забезпечити попереджувальне виведення їх на поточний або капітальний ремонт, або відправлення на регулювання. Інтервал часу від початку експлуатації $t = 0$ до моменту, коли вихід окремих реалізацій $A_j(t)$ випадкового процесу $A(t)$ за межі $A_{\text{ãð}}$ робочої області стає частим явищем, називають ***часом збереження працездатності*** $t_{\text{çá}}$. Правий кінець інтервалу $t_{\text{çá}}$ визначається абсцисою характерної точки кривої ЩРВ $f\{X(t)\}$, починаючи з якої спостерігається різке зростання кривої.

Маючи інформацію про реальне значення часу досягнення ВП граничного значення $t_r < t_{çá}$ на етапі проектування, можна аналітично розрахувати час збереження працездатності ситеми, тобто зробити обґрунтований прогноз про працездатність у майбутньому. Це дасть змогу вчасно попередити відмови, а також керувати станом складних САК, замінюючи їх елементи резервними, проводячи підрегулювання або змінюючи робочі режими САК.

Нестаціонарний випадковий процес A(t) характеризує довгострокові необоротні зміни параметрів у результаті зношування, старіння або розрегулювання. Процес $A(t)$ – основна причина відмов, його можна назвати ***процесом зношування.***

Для випадкових процесів зношування типовими є досить жорсткі зв’язки між значеннями параметра у послідовні моменти часу. Великий вплив на вид реалізації процесу $A(t)$ справляє фізико-хімічна структура матеріалу і технологія виготовлення об’єкта. Однотипні об’єкти дають близькі за формою криві зношування, але з різними значеннями швидкості зношування. Тому моделі процесів зношування повинні бути функціонально залежними від часу, а їх випадковий характер обумовлюється випадковими параметрами, що не залежать від часу. Подібні випадкові процеси іноді називають ***детермінізованими*** або ***напіввипадковими.***

Випадковий процес $A(t)$ зношування можна розглядати як залежність

$$A(t) = A_0 + \int_0^t B(\tau)d\tau, \quad \tau \in [0,\ t],$$

де A_0 – початкове (заводське, фабричне, промислове, виготовлене, настроєне тощо) значення ВП; $B(t)$ – напіввипадковий процес зміни *швидкості* зношування. Початкове значення A_0 ВП є випадковою величиною, що іноді має усічений (через допуск підприємства-виробника) розподіл, але не залежить від часу *t*.

Як відомо, основою випадкових процесів зміни ВП є необоротні випадкові зміни ВП, викликані старінням, зношуванням або розрегулюванням. Вони певною мірою залежні від часу, їх можна розглядати (з деякою мірою ймовірності) як *поступові*. При цьому *випадковий* характер таких змін обумовлений *випадковими* параметрами, що *не залежать від часу*. Отже, моделі реальної зміни ВП об’єкта мають бути випадкововими функціями, аргументами яких є постійні у часі випадкові величини й сам час.

Розглянемо найпоширеніші моделі (класи моделей) нестаціонарних випадкових процесів наближення до відмов.

Лінійні випадкові функції. Під час лінеаризації реального процесу зношування об’єкта кожна реалізація $A_j(t)$ процесу заміняється прямою, тобто реальний процес зміни ВП $A(t)$ апроксимується випадковою функцією вигляду

$$A = A_0 \pm Vt, \tag{6}$$

де A_0 – випадкове початкове значення ВП (за $t = 0$), що має математичне сподівання (МС) $m_{A0} = M\{A_0\}$ та середнє квадратичне відхилення (СКВ) $S_{A0} = \sqrt{D_{A0}}$, $A_0 = A(t = 0)$; V – випадкова нормально розподілена швидкість зміни ВП у часі, що має МС $m_V = M\{V\}$ та СКВ $S_V = \sqrt{D_V}$, $V = \{\nu\}$.

Нелінійні випадкові функції. Для багатьох об'єктів є типовою деяка постійна відносна швидкість зміни ВП $\dfrac{dA(t)/dt}{A(t)} = V^*$, що відповідає нелінійному випадковому процесу $A(t)$, який апроксимується випадковою функцією вигляду

$$A = A_0 \exp(\pm V^* t), \tag{7}$$

де V^* – випадкова, нормально розподілена швидкість зміни натурального логарифма ВП $V^* = \dfrac{d \ln A}{dt}$, що має МС $m_{V*} = M\{V^*\}$ та СКВ $S_{V*} = \sqrt{D_{V*}}$.

У моделях обох класів (6) та (7) знаки «+» і «–» використовуються для апроксимації відповідно зростаючих й спадних у часі процесів. Випадкова величина X_0 у моделях (6) та (7) є постійною в часі, як і випадкова величина швидкості *V* зміни ВП у моделі (6). У моделі (7) постійною в часі є швидкість зміни *логарифма* ВП, сам же ВП має змінювану у часі швидкість зміни.

Для зручності подальшого розгляду моделей тільки в лінійному варіанті модель (7) логарифмуванням перетворимо у лінійну модель зміни логарифма ВП:

$$\ln A(t) = \ln A_0 \pm V^* t. \qquad (8)$$

Якщо позначити натуральний логарифм ВП випадковою функцією $Y(t)$, тобто $Y(t) = \ln A(t)$; $Y_0 = \ln A_0$, то вираз (8) можна представити як

$$Y(t) = Y_0 \pm V^* t, \qquad (9)$$

подібний моделі (6). Тобто можна розглядати різні модифікації випадкових процесів тільки для $A(t)$, а результати аналізу використовувати сумісно, як для ВП $A(t)$, так і для $\ln A(t)$, тому що моделі для $A(t)$ та $\ln A(t)$ будуть подібні.

Розглянуті лінійні моделі зручні для апроксимації випадкових процесів зміни ВП тим, що дають можливість характеризувати ці процеси обмеженою кількістю аргументів моделі, для визначення яких потрібен мінімальний обсяг експериментальних даних.

Крім того отримані вирази (23), (24) та інші, з яких можна визначити час t, дозволяють знайти час збереження працездатності $t_{\text{çá}}$, і таким чином визначити критерій відмови робастно стійкої системи.

8. Висновки

1. Досягнення САК межі параметричної (робастної) стійкості можна розглядати як перехід системи в стан непрацездатності (в стан відмови). Час переходу САК з початку її функціонування до моменту втрати параметричної стійкості можна нормувати ***робастним критерієм її відмови***, який обмежує допустиме значення призначеного ресурсу САК при її проектуванні. Такий критерій також дозволить враховувати процеси фізичної деградації САК під час її експлуатації при нормуванні часу наступного підрегулювання (тривалості межремонтного періоду).

2. *Робастний критерій відмови* визначається для квазі стаціонарних і нестаціонарних систем згідно умов робастної стійкості стаціонарних систем [6], якщо використати замість фіксованого значення визначального параметра САК його функціональну залежність від часу.

Список літератури

1. Канарчук В. Є. Надійність машин: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / В. Є. Канарчук, С. К. Полянський, М. М. Дмитрієв. – К.: Либідь, 2003. – 424 с.
2. Нечипоренко О. М. Основи надійності літальних апаратів: навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / Олена Миколаъвна Нечипоренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 240 с.
3. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие [для студ. высш. учебн. завед.] / Г. Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
4. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення: ДСТУ 3433-96. – [чинний від 1996--]. – К.: Держстандарт України, 1998. – 42 с. – (Національний стандарт України).
6. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т1. Линейные системы / Д. П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.