ТЕХНІКА

УДК 683.3

М.К. Жердєв, д-р техн. наук, проф.,
Г.Б. Жиров, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
П.А. Шкалюпа, канд. техн. наук

ОБЛАСТЬ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ АНАЛОГОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ

Визначається область працездатності аналогового пристрою для динамічного методу діагностування. Формуються критерії працездатності аналогового пристрою. Це дозволяє застосувати динамічний метод діагностування до аналогових пристроїв, що працюють як система автоматичного управління.
Ключові слова: динамічний метод, критерій працездатності, аналоговий пристрій.

Определяется область работоспособности аналогового устройства для динамического метода диагностирования. Формируются критерии работоспособности аналогового устройства. Это позволяет применить динамический метод диагностирования к аналоговым устройствам, которые работают как система автоматического управления.
Ключевые слова: динамический метод, критерий работоспособности, аналоговое устройство.

The area of working capacity of the analogue device for a dynamic method of diagnosing is defined. Criteria of working capacity of the analogue device are formed. It allows to apply a dynamic method of diagnosing to analogue devices which work as automatic control system.
Keywords: a dynamic method, criterion of working capacity, the analogue device.

Вступ. Працездатність аналогового пристрою (АП) в динамічному режимі найбільш об'єктивно може бути оцінена за допомогою показників якості перехідного процесу (ПП). Отже, найбільш інформативною функцією працездатності є функція, що представляє собою вихідний сигнал АП $y_{вих}(t)$. Дана функція характеризує ПП по відповідній вихідній координаті, що може знаходитися в шині живлення аналогового пристрою.

Методи одержання перехідної функції досить широко розглянуті в класичній теорії. Характеристика працездатності системи в загальному випадку може бути отримана в результаті аналізу ПП при різних несправностях, кількісно виражених варіаціями коефіцієнтів системи.

Оскільки необхідно класифікувати справний і несправний стан АП, то виникають завдання формування діагностичної моделі (ДМ) аналогового пристрою для аналізу впливу несправностей на його працездатність по тому або іншому критерію. Результат такого аналізу дозволяє визначити напрямок проектування засобу діагностування [1].

У процесі функціонування аналоговий пристрій переходить із одного стану в інший. У зв'язку з тим, що вихідним є справний стан і він визначений, найбільш істотним варто вважати визначення оператора переходу системи в ті або інші несправні стани. Математичне формулювання оператора може бути різним залежно від природи АП, його структури, характеру припущень, і ін. Обмеженість вірогідності знань про закономірності переходів АП приводить у ряді випадків до необхідності використання імовірнісних характеристик.

Перехід АП в різні стани проходить під впливом виникнення несправностей. При діагностуванні результат переходу АП в той або інший новий стан відомий, хоча не завжди можуть бути достовірно визначені причини цього переходу. Коли причини невідомі, можливо встановити деякий регулярний взаємозалежний ланцюг подій, який з певною достовірністю, що залежить від числа і якості спостережень, установлює зазначену закономірність.

Множину станів АП можна представити в аналоговій або дискретній формі. Форма, у якій задано стан пристрою в динамічному режимі, визначає спосіб завдання умов працездатності. З іншого боку, умови працездатності необхідно погоджувати з можливими шляхами оцінки працездатності АП в динамічному режимі. На практиці визначити працездатність технічних систем можна з комплексу технічних характеристик, по сукупності його параметрів, якості безпосереднього виконання робочих функцій (функціонування) або стану окремих елементів системи, то, мабуть, і умови працездатності варто розглядати відповідно до цих показників стану.

Постановка завдання. В роботі розглядаються аналогові пристрої, що працюють як система автоматичного управління в динамічному режимі. Пропонується їх працездатність перевіряти динамічним методом діагностування. Суть динамічного методу діагностування АП, що працюють як система автоматичного управління, полягає в тому, що оцінка їх працездатності проводиться по показниках якості перехідного процесу.

Працездатність АП в динамічному режимі, математичну модель яких можна представити лінійним диференціальним рівнянням, визначається умовами, при яких дійсні складові корені характеристичного рівняння системи негативні.

Якщо працездатність АП в динамічному режимі забезпечується обмеженням якісних показників ПП, то умови працездатності можна одержати в комплексній площині, обмеживши припустимі переміщення коренів характеристичного рівняння лініями рівних значень заданих показників (наприклад, коефіцієнта демпфірування, власної частоти).

Завдання умов працездатності в загальному вигляді в комплексній площині дозволяє одержати умови працездатності в вигляді області припустимих деформацій характеристик технічної системи. Область припустимих деформацій часових характеристик можна одержати безпосередньо по обмеженнях, накладених на показники в комплексній площині, зокрема, на зміни коефіцієнтів характеристичного рівняння, і, як наслідок, у вигляді областей припустимих змін окремих параметрів АП в динамічному режимі. Для цього необхідно розв'язати рівняння

$$L_n(\lambda)x = F(x,\lambda),$$

де, L_n – диференціальний оператор n-го порядку, що застосовується до елемента $x(t)$, коефіцієнти якого $a_i(t,\lambda)$ є безперервними функціями t і аналітичними функціями комплексного параметра λ;

$F(x,\lambda) = \sum_{k,r=0}^{\infty} b_{kr}(t)x^k\lambda^{kr}$ – аналітична в деякій області функція аргументів x і λ, яку можна представити,

© Жердєв М.К., Жиров Г.Б., Шкалюпа П.А., 2012

використовуючи метод малого параметра, у наступному вигляді

$$x(t,\lambda) = x_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} x_k(t)\lambda^k . \qquad (1)$$

Застосування методу малого параметра припускає обов'язкове дотримання наступних умов:

а) кожен коефіцієнт у (1) визначається в результаті кінцевого числа дій;

б) ряд (1) повинен бути збіжним при досить малих λ [2].

Визначимо критерій оцінки працездатності для діагностування аналогових пристроїв в динамічному режимі динамічним методом. При діагностуванні аналогових пристроїв по ПП необхідно визначити критерії, по яких у засобі діагностування приймається рішення про справний або несправний об'єкт діагностування.

Основна частина. Аналітична форма критерію працездатності визначається відповідно до моделі діагностування розв'язанням рівнянь, що описують динаміку контрольованого аналогового пристрою. У [1] пропонується підхід, в основі якого прийняте положення, відповідно до якого кожна несправність, що проявляється в зміні параметра елемента, певним чином спотворює фізичну картину перехідного процесу системи. У цьому випадку аналіз працездатності також здійснюється по перехідному процесу, однак характер процесу в кожному конкретному випадку буде відповідати певній несправності. При цьому по характеру зміни перехідного процесу можна однозначно визначати тип несправності. У цьому випадку та або інша несправність розглядається як зовнішній вплив (при $x_{вх} = 0$), що прикладений до елемента, який іде за несправним.

В основу підходу до вибору критерію оцінки працездатності АП покладена залежність функції працездатності $x_{вих}(t)$ від її початкових значень і передаточної функції системи. Цю залежність можна знайти з використанням операторних методів аналізу за допомогою перетворення Лапласа. При послідовному інтегруванні по частинам

$$\int_0^{\infty} x(t)e^{-pt}dt = \frac{1}{p}[x(0) + \int_0^{\infty} \frac{dx(t)}{dt}e^{-pt}dt] , \qquad (2)$$

і переході до границі одержимо вираз для початкового значення $x(t)$ і її похідних у вигляді

$$\begin{aligned} &x(0) = \lim[px(p)]; \\ &x'(0) = \lim[p^2x(p) - px(0)]; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &x^m(0) = \lim[p^{m+1}x(p) - p^m x(0) - \ldots - px^{m-q}(0)]. \end{aligned} \qquad (3)$$

Граничний перехід ($p \to 0$) дає відомі співвідношення між сталим значенням ($t = \infty$) функції працездатності і її похідних.

Для замкнутої системи з передаточною функцією у формі

$$\Phi(p) = \frac{b_1p^m + b_2p^{m-1} + \ldots + b_m}{a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_n} , \; m \le n \qquad (4)$$

відповідні значення функції працездатності приймають вигляд

$$\begin{aligned} &x(0) = 0; \\ &x'(0) = b_1 / a_1; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &x^{(n-1)}(0) = \frac{a_{n-1}}{a_0} - \frac{a_{n-2}}{a_0}x'(0) - \ldots - \frac{a_1}{a_0}x^{(n-2)}(0). \end{aligned} \qquad (5)$$

З (5) випливає, що початкові значення функції працездатності і її похідних будуть змінюватися залежно від місця подачі збурюючого впливу і його характеру. Збурюванням є сигнал (або перекручування сигналу) при виникненні несправності в аналоговому пристрої.

Зміна функції працездатності може розглядатися як наслідок зміни чисельних значень коефіцієнтів a_i. У цьому випадку можна не тільки якісно кваліфікувати несправності, але й визначити, користуючись початковими значеннями похідних $x(t)$, основні показники працездатності. Розглянемо особливості формування критеріїв працездатності з урахуванням призначення систем і специфіки завдань діагностування.

Функція працездатності лінійного безперервного АП в динамічному режимі $x_{вих}(t)$ графічно може бути представлені кривими, що обмежують параметри працездатності перехідного процесу заданими граничними значеннями $x^{н}_{вих}(t)$, $x^{в}_{вих}(t)$ (рис. 1).

Раніше було показано, що залежно від призначення системи її працездатність кількісно може бути охарактеризована граничним перерегулюванням і швидкістю перехідного процесу. Працездатність пристрою визначають функції $x^{н}_{вих}(t)$, $x^{в}_{вих}(t)$, при цьому вигляд цих функцій залежить від параметрів елементів контрольованої системи (діагностичних параметрів).

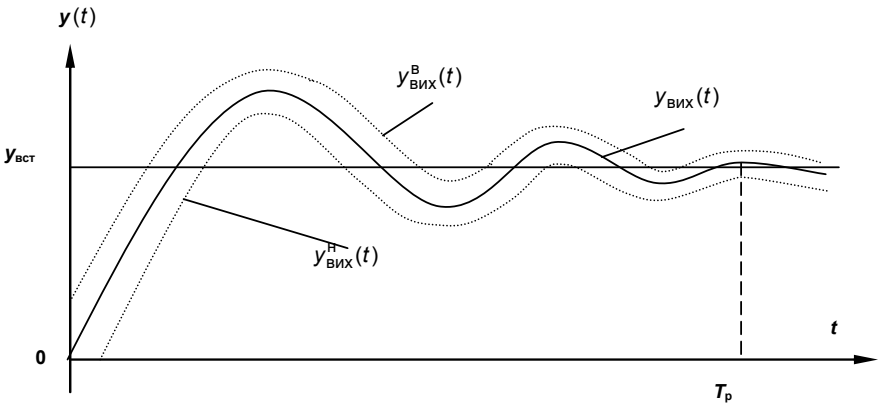


Рис. 1. Граничні криві функції працездатності аналогового пристрою в динамічному режимі

Більшість АП в динамічному режимі, а також підсистем складних АП в динамічному режимі має невисокий (3-4) порядок характеристичного рівняння, що в значній мірі полегшує аналіз функції працездатності, тому що дозволяє без шкоди для точності аналізу використовувати залежності, отримані для систем більш низького, зокрема другого, порядку. Можливість такого спрощення пояснюється нерівноцінним впливом коренів характеристичного рівняння на показники якості перехідного процесу.

Уведемо в розгляд функцію працездатності [1]

$$y(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k e^{-p_k t}\ , \qquad (6)$$

яка пов'язана з вихідною координатою $x_{\text{вих}}(t)$ співвідношенням

$$y(t) = x_{\text{вст}} - x_{\text{вих}}(t)\ . \qquad (7)$$

Оскільки коефіцієнти A_k рівняння (6) можуть бути виражені через початкові величини $x^{(k)}_{\text{вих}}(t)_{t=0}$ й корені характеристичного рівняння p_k, тому функція $y(t)$ тією самою мірою може служити характеристикою працездатності контрольованої системи.

Для систем n-го порядку функція працездатності і її похідних мають вигляд

$$y_n(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k e^{-p_k t};$$

$$y'_n(t) = -\sum_{k=1}^{n} A_k p_k e^{-p_k t}; \qquad (8)$$

$$y''_n(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k p_k^2 e^{-p_k t}.$$

При дійсному p_m для працездатності $y_{n-1}(t)$ системи $(n-1)$-го порядку з (8) одержимо

$$y_{n-1}(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k (1 - \frac{p_k}{p_m}) e^{-p_k t}\ . \qquad (9)$$

Так як

$$y_{(n-1)}(t) = y_n(1) + \frac{1}{p_m} y'_n(t)\ , \qquad (10)$$

то по зміні функції працездатності, що описується системою рівнянь $(n-1)$-го порядку, можна судити про функцію працездатності системи n-го порядку. Для системи $(n-2)$-го порядку функція працездатності знаходиться по (9) з виразу для першої похідної $y'_{n-1}(t)$:

$$y'_{n-1}(t) = \sum_{k=1}^{n} p_k A_k (1 - \frac{p_k}{p_m}) e^{-p_k t}\ . \qquad (11)$$

Підсумовуючи рівняння (9) і (11) після ділення (11) на p_{m-1} одержимо

$$y_{n-1}(t) + \frac{1}{p_{m-1}} y'_{n-1}(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k (1 - \frac{p_k}{p_m})(1 - \frac{p_k}{p_{m-1}}) e^{-p_k t} = y_{n-2}(t)\ .$$

Продовжуючи процес виключення коренів, можна знайти досить просте розрахункове значення функції працездатності $y_{n-s}(t)$ системи $(n-s)$-го порядку.

При комплексних сполучених коренях $p_m = \alpha + j\beta$; $p_{m-1} = \alpha - j\beta$, використовуючи викладені міркування, одержимо вирази для функції працездатності

$$y_{n-2}(t) = \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \sum_{k=1}^{n} A_k [(\alpha - p_k)^2 + \beta^2] e^{-p_m t}\ .$$

Для системи з передаточною функцією

$$W(p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{b_1 p + b_2}{p^2 + a_1 p + a_2}\ ,$$

функція працездатності, що відповідає граничним кривим при прийнятих позначеннях (7):

$$y_{\text{гр}}(\text{t}_\text{e}) = \pm y_0 \sqrt{\frac{\phi(y_1 / y_0)}{a_2} e^{-\frac{a_1}{2} t_\text{e}}}\ , \qquad (12)$$

де $y_0 = \lim W(p)(p \to \infty)$;

$\phi(y_1 / y_0) = (y_1 / y_0)^2 + a_1 y_1 / y_0 + a_2$ – функція $\phi(p)$ при $p = y_1 / y_0$;

t_e – екстремальне значення породжуючої функції працездатності.

Ординати $y_{\text{гр}}(t)$ при $t = t_\text{e}$ збігаються з ординатами функції працездатності $\tilde{y}(t)$.

У тому випадку, коли корені p_1, p_2 породжуючої функції $\tilde{y}(t)$ є комплексними сполученими числами, розрахункова формула для граничних $y^{\text{н}}_{\text{вих}}(t)$, $y^{\text{в}}_{\text{вих}}(t)$ кривих приймає вигляд [1]:

$$y_{\text{гр}}(t_\text{e}) = \pm y_0 \sqrt{\frac{\phi(y_1 / y_0)}{a_2}} e^{\frac{-\alpha_1(\text{j}+m\pi)}{2\beta}}\ , \qquad (13)$$

де

$$\gamma = arctg \frac{2\beta y_1}{2a_1 y_0 + a_1 y_1}\ ;\ N_2 = 4\ ,\ (m=0,\ 1,\ 2,\ldots).$$

Істотними якісними характеристиками працездатності динамічних АП є швидкості й прискорення регульованої величини.

Вирази для граничних значень функції, що характеризує швидкість зміни й прискорення регульованої величини, будуть мати вигляд:

$$y'_{\text{гр}}(t_\text{e}) = \pm y_0 \sqrt{\phi(y_1 / y_0)} e^{-\alpha_1 t_\text{e} / 2}\ , \qquad (14)$$

$$y''_{\text{гр}}(t_\text{e}) = \pm y_0 \sqrt{\alpha_2 \phi(y_1 / y_0)} e^{-\alpha_1 t_\text{e} / 2}\ . \qquad (15)$$

Висновок. Вирази (12)…(15) являються вихідними для формування критеріїв працездатності по максимальному перерегулюванню, часу регулювання, швидкості й прискоренню регульованої величини за допомогою породжуючої функції працездатності.

Оцінка працездатності з використанням розглянутих критеріїв зі значним спрощенням розрахунків містить ряд переваг, а саме:

динамічний метод діагностування можна застосувати до широкого класу аналогових пристроїв, що працюють як система автоматичного управління;

динамічний метод відповідає вимогам діагностування як при визначенні поточного рівня працездатності контрольованої системи, так і при класифікації екстремальних значень працездатності АП в динамічному режимі.

1. Глазунов Л.П. Проектирование технических систем диагностирования / Л. П. Глазунов, А. Н. Смирнов. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 168 с. 2. Технические средства диагностирования: справочник / В.А. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; под ред. В.А. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

Надійшла до редколегії 17.09.12