

УДК 681.178 (045)

Ю.Т. Гуз, к.т.н., доц.
С.В. Єнчев, к.т.н., доц.
А.О. Сильнягін, к.т.н., доц.
І.В. Прохоренко, асп.
Т.А. Мазур, асп.

ПРИСТРІЙ-ІДЕНТИФІКАТОР МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЕ

Розроблено метод та структурну схему пристрою для ідентифікації механічної характеристики реле постійного струму, магнітна система якого є нелінійною.

The method and the block diagram of the device are developed for identification to the mechanical characteristic of the relay of a direct current, which magnetic system nonlinear.

електромагнітна система, ідентифікація, механічна характеристика, пристрій, реле постійного струму, точність

Постановка проблеми

Оцінювання технічного стану електромагнітної системи (ЕМС) реле постійного струму з нелінійною магнітною характеристикою є складною науково-технічною проблемою. Недосконалість сучасних методів діагностування, відсутність автоматизованих засобів контролю (АЗК) та автоматизованого діагностування електромагнітного комутаційного обладнання зумовлюють економічні та технічні ускладнення під час їх експлуатації та ремонту, що науково обґрунтовує необхідність і доцільність створення таких АЗК з метою підвищення ефективності процесів діагностування ЕМС постійного струму за рахунок використання сучасних інформаційних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений порівняльний аналіз останніх досліджень і публікацій [1–5] існуючих методів й засобів контролю та діагностування ЕМС вказує на недотримання вимог безпеки польоту та експлуатації механічної характеристики постійного струму, а саме:

- недопустимо низький рівень точності ідентифікації механічної характеристики;
- низький рівень проведення робіт;
- низький рівень точності під час визначення моменту та значення струму;
- відомі методи діагностування електромагнітних систем мають суттєву ваду, що виражається у громіздкості, складності і великій собівартості з обов'язковою розгерметизацією корпусу реле.

Мета роботи – розроблення методу та структурної схеми пристрою з ідентифікації механічної характеристики реле постійного струму насиченою магнітною схемою за рахунок реалізації потенційних можливостей динамічних властивостей струму, що протікає через обмотку електромагнітного реле.

Динамічна модель руху якоря реле з насиченою магнітною системою

Пристрій належить до сфери діагностики комутаційної апаратури, а більш конкретно – до пристроїв для ідентифікації (визначення параметрів) механічної характеристики реле постійного струму як із поворотним якорем (клапанного типу), так і з якорем, що поступально рухається, в яких магнітна система нелінійна (тобто реле працює на нелінійній ділянці кривої початкового намагнічування сталі магнітопроводу).

Приведемо теоретичне обґрунтування застосованого методу ідентифікації.

Рівняння динаміки електромагнітів клапанного типу (з поворотним якорем) у випадку нелінійної електромагнітної системи для етапу руху якоря можна записати у вигляді [2]:

$$U = i_p R + \frac{d\psi_p}{dt}; \quad (1)$$

$$\psi_p = f(i_p, \varphi_p); \quad (2)$$

$$J \frac{d^2 \varphi_p}{dt} + Q \frac{d\varphi_p}{dt} + M_{пр}(t) = \frac{d \int_{i_p}^{i_{вл}} d\psi_p}{d\varphi_p}, \quad (3)$$

де

U – напруга джерела живлення;

i_p – миттєве значення струму в обмотці реле;

R – активний опір в обмотці реле;

ψ_p – магнітне потокозчеплення;

φ_p – кут повороту якоря під час руху;

J – момент інерції якоря;

Q – коефіцієнт лінійного тертя, що є в загальному випадку функцією i_p і φ_p ;

$M_{np}(t)$ – залежність протидійного моменту від часу;

$\int_{i_{зр}}^{i_{уд}} id\psi = W_E$ – повна електромагнітна енергія системи;

$i_{уд}$ – струм удару;

$i_{зр}$ – струм зрушення.

Розв'язавши рівняння (3) відносно $M_{np}(t)$, отримуємо

$$M_{np}(t) = \frac{d \int_{i_{зр}}^{i_{уд}} i_p d\psi_p}{d\phi_p} - J \frac{d^2 \phi_p}{dt^2} - Q \frac{d\phi_p}{dt}. \quad (4)$$

Рух якоря реле можна описати співвідношеннями [2; 3]:

$$i_p(t) = I_y - I_y \frac{(K_{з.зр} - 1)e^{\alpha t}}{K_{з.зр}} - I_y \frac{(K_{з.зр} - 1)}{6K_{з.зр}\tau_p^3} \times \left[2\tau_p + [\alpha(2 + 3\alpha) + (K_{з.зр} - 1)(\vartheta + \theta)]t \right]; \quad (5)$$

$$\phi_p(t) = \frac{(K_{з.зр} - 1)N_-}{24K_{з.зр}^2 \mathfrak{S}\phi_1} t^3 \times \left[4 + (K_{з.зр} - 2)\frac{t}{\tau_p} - 2E_p t - (K_{з.зр} - 1)\alpha \frac{t}{\tau_p} \right]; \quad (6)$$

$$\psi_p(t) = \tau_p U - \frac{\tau_p U (K_{з.зр} - K_\psi)}{K_{з.зр}} e^{\frac{t}{\tau_p}} + \frac{U(K_{з.зр} - 1)}{24K_{з.зр}\tau_p^3} t^3 \times \left\{ (8 + 4\alpha)\tau_p + [\alpha(2 + 3\alpha) + (K_{з.зр} - 1)(\vartheta + \theta)]t \right\}, \quad (7)$$

причому

$$K_{з.зр} = I_y / I_{зр};$$

$$\tau_p = \frac{(d\psi/di)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1}}{R};$$

$$N_y = UI_y;$$

$$\alpha = \frac{(d^2\psi/di^2)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1} I_{зр}}{(d\psi/di)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1}};$$

$$\vartheta = \frac{(d^3\psi/di^3)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1} I_p^2}{(d\psi/di)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1}};$$

$$\theta = \frac{i_p^3 U}{(K_{з.зр} - 1)K_{з.зр} I \phi_1} \frac{(d\psi/d\phi)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1}}{(d\psi/di)_{i=I_{зр}; \phi=\phi_1}};$$

$$K_\psi = \frac{K_{з.зр} \phi_{зр}}{\tau_p \psi},$$

де

$K_{з.зр}$ – коефіцієнт запасу за струмом зрушення;

α – коефіцієнт, що враховує магнітний опір сталі в першому наближенні;

ϑ – коефіцієнт, що враховує магнітний опір сталі в другому наближенні;

θ – коефіцієнт, що враховує (крім іншого) зміну магнітного опору повітря;

ϕ – кут, що відповідає відтягнутому верхньому положенню якоря;

$I_{зр}$ – струм зрушення;

K_ψ – коефіцієнт, що враховує нелінійність ЕМС;

$\psi_{зр}$ – магнітне потокозчеплення зрушення;

$\epsilon_p = 0,6K_{з.зр}^2$ – коефіцієнт демпфірування.

Вирази (5)–(7) описують реальні динамічні процеси з похибкою не вище 1,5 %, що для нелінійної електротехніки є високою точністю розв'язання системи нелінійних рівнянь (1)–(3).

Ідентифікація параметрів механічної характеристики реле

Для розв'язання рівняння (4) і знаходження залежності $M_{np}(t)$ потрібно знати:

$$\frac{d^2 \phi_p}{dt^2};$$

$$\frac{d\phi_p}{dt}, \quad (8)$$

– значення струму зрушення і струму удару якоря об обмежувач;

– залежності від часу струму в обмотці реле у період руху, диференціала від потокозчеплення, моменту інерції якоря та коефіцієнта лінійного тертя.

У свою чергу аналіз виразів (5) – (7) показує, що передусім необхідно ідентифікувати параметри $K_{з.зр}$, τ_p , α (рис. 1), після чого можна отримати

$$\frac{d^2 \phi_p}{dt^2}(t) \text{ та } \frac{d\phi_p}{dt}(t).$$

Будемо вважати, що значення струму зрушення $I_{зр}$, і струму удару $I_{уд}$, момент зрушення $t_{зр}$ і момент зупинки (удару) якоря об обмежувач $t_{уд}$, визначаються технічним пристроєм.

За відомим значенням $I_{зр}$ можна розрахувати $K_{з.зр}$ згідно з формулою (8).

Із рис. 1 випливає

$$\left(\frac{di_p}{dt}\right)_{\substack{t=t_{зр} \\ I=I_{зр}}} = \frac{I_{уд} - I_{зр}}{\tau_p},$$

звідки

$$\tau_p = \frac{I_{уд} - I_{зр}}{\left(\frac{di_p}{dt}\right)_{t=t_{зр}; I=I_{зр}}}. \tag{9}$$

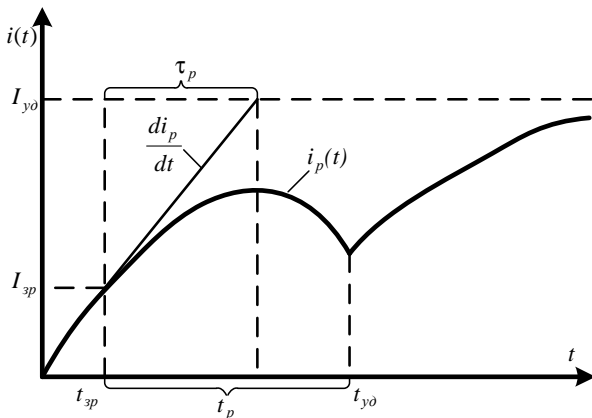


Рис. 1. Визначення електромагнітної сталості під час руху якоря

Для визначення коефіцієнта α скористаємося таким прийомом. За час

$$t_p = t_{уд} - t_{зр}$$

якір повернеться на постійний для кожного конкретного типорозміру реле кут:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1,$$

де

φ_1 – початкове значення кута у верхньому положенні якоря.

У рівнянні (6) введемо позначення:

$$m = \frac{(K_{з.зр} - 1)N_-}{24K_{з.зр}^2 I\varphi_1};$$

$$n = K_{з.зр} - 2;$$

$$K_{з.зр} - 1 = n + 1.$$

Після чого отримаємо

$$\Delta\varphi = 4mt_p^3 + mt_p^4 \left[\frac{n}{t_p} - 2\varepsilon_p - \frac{(n+1)\alpha}{\tau_p} \right]. \tag{10}$$

Вираз (10) запишемо відносно α :

$$\alpha = \frac{n - 2\varepsilon_p \tau_p - \frac{(\Delta\varphi - 4mt_p^3)\tau_p}{mt_p^4}}{n + 1}. \tag{11}$$

Отже, вирази (8)–(11) описують алгоритм обчислення коефіцієнта запасу за струмом зрушення, постійної часу τ_p електромагнітної системи і коефіцієнт α , що враховує магнітний опір сталі у першому наближенні.

Тепер уведемо в рівняння (4) декілька нових позначень, вважаючи α і τ_p вже обчисленими

$$m = \frac{(K_{з.зр} - 1)N_y}{24K_{з.зр}^2 J\varphi_1};$$

$$P_1 = \frac{K_{з.зр} - 2}{\tau_p};$$

$$P_2 = 2\varepsilon_p;$$

$$P_3 = \frac{(K_{з.зр} - 1)\alpha}{\tau_p}.$$

Перепишемо співвідношення (6) з урахуванням рівнянь (12)

$$\varphi_p(t) = 4mt^3 + m(P_1 - P_2 - P_3)t^4.$$

Візьмемо похідні

$$\frac{d\varphi_p}{dt} = 12mt^2 + 4m(P_1 - P_2 - P_3)t^3; \tag{13}$$

$$\frac{d\varphi_p^2}{dt^2} = 24mt + 12m(P_1 - P_2 - P_3)t^2. \tag{14}$$

У правій частині рівняння (3) стоїть вираз для

$$\frac{d \int_{i_{зр}}^{i_{уд}} i_p d\psi_p}{d\varphi_p}.$$

Замість $d\psi_p$ підставимо його значення, отримане з рівняння (1):

$$d\psi_p = (U - i_p R) dt.$$

Тоді вираз для електромагнітного моменту набуває вигляду

$$M_e = \frac{d \left[\int_{i_{зр}}^{i_{уд}} i_{уд} (U - i_p R) dt \right]}{d\varphi_p}. \tag{15}$$

Вираз (4) можна записати так:

$$M_{np}(t) = \frac{d \int_{i_{sp}}^{i_{yd}} (U - i_p R) dt}{d\phi_p} - J \frac{d^2 \phi_p}{dt^2} - Q \frac{d\phi_p}{dt} \quad (16)$$

На кожному інтервалі часу вираз (15) розраховується чисельно як відношення приросту електромагнітної енергії ΔW_e до приросту кута повороту якоря $\Delta\phi_p$ на цьому відрізку часу.

Оскільки ΔW_e і $\Delta\phi_p$ залежать від часу, то і M_e є також функцією часу:

$$W_e = \int_{i_1}^{i_2} i_p \Delta\psi_p \cdot$$

Коефіцієнт лінійного тертя

$$Q = 0,6K_{3,3p}^2 J \cdot$$

Тоді остаточний алгоритм ідентифікації механічної характеристики реле має вигляд:

$$M_{np}(t) = \frac{d \int_{i_{sp}}^{i_{yd}} (U - i_p R) dt}{d\phi_p} - I \left[12mt^2 + 4m(P_1 - P_2 - P_3)t^3 \right] - 0,6K_{3,3p}^2 I \left[24mt + 12m(P_1 - P_2 - P_3)t^2 \right] \quad (17)$$

Розробка пристрою-ідентифікатора механічної характеристики реле

Силовий вихід керованого джерела живлення (КДЖ) через контактор 7 (рис. 2) послідовно з'єднаний з обмоткою 12 випробуваного реле (активний опір обмотки дорівнює R) і прецизійним опором r ($R \gg r$). Падіння напруги на прецизійному опорі r дорівнює в загальному випадку ri_b (i_b – струм в обмотці).

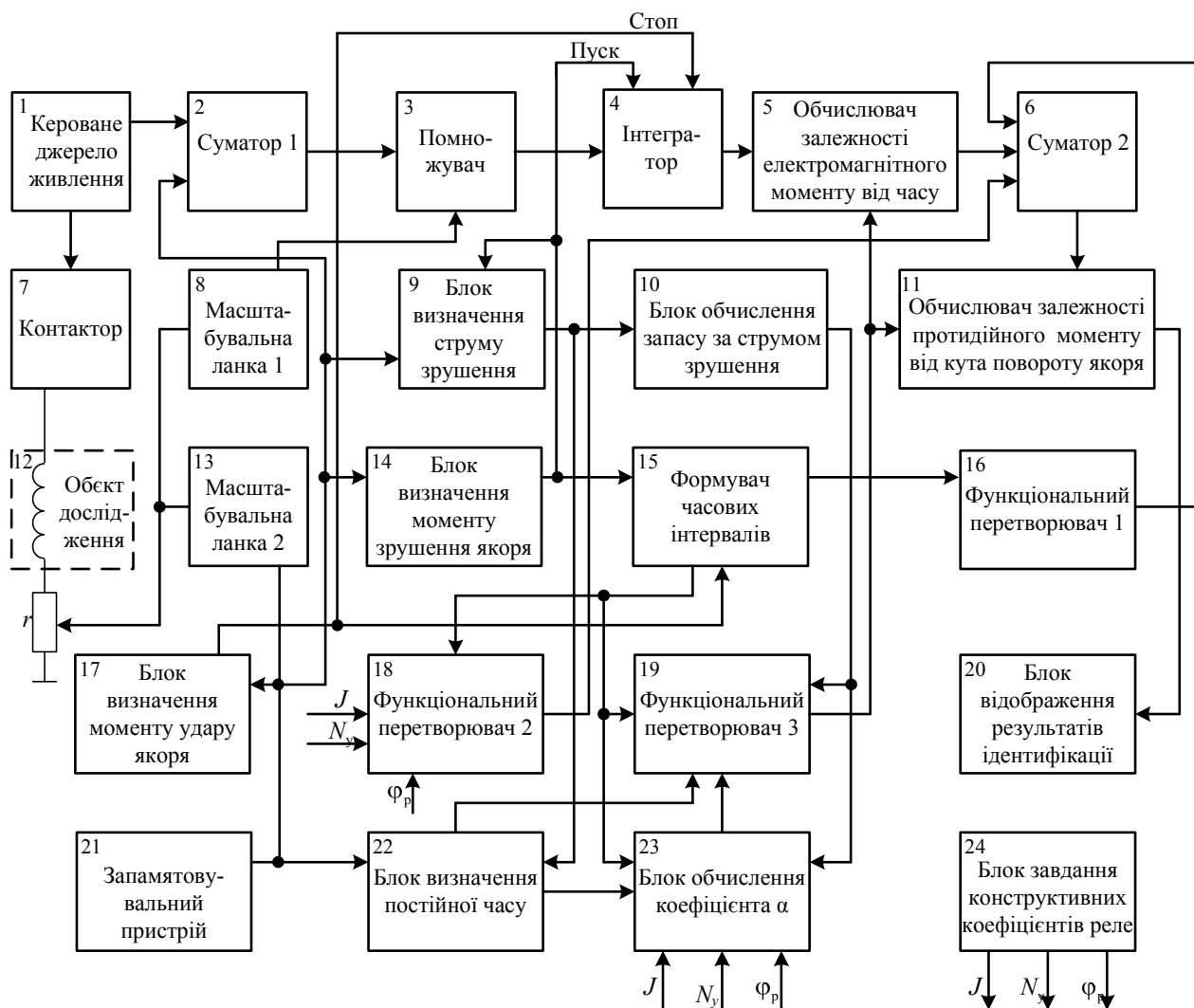


Рис. 2. Структурна схема пристрою-ідентифікатора механічної характеристики

Під час руху якоря падіння напруги на прецизійному опорі r становить $i_p r$.

Напруга $i_p r$ подається на вхід масштабного перетворювача (МП 13), що має коефіцієнт передачі $\frac{R}{r}$, так що напруга на його виході

$$i_p r \frac{R}{r} = i_p R,$$

тобто дорівнює падінню напруги на активному опорі обмотки 12 випробовуваного реле. Вихід МП 13 поданий на другий (від'ємний) вхід двохходового суматора 2, на перший вхід якого подано напругу U із сигнального виходу КДЖ. Вихід суматора 2 поданий на перший вхід помножувача 3, на другий вхід якого подано сигнал із виходу другого МП 8 з коефіцієнтом передачі $\frac{1}{r}$, вхід якого зв'язаний безпосередньо з виходом прецизійного опору.

Таким чином, напруга на другому вході помножувача 3 пропорційна $i_p r \frac{1}{r}$, тобто струму в об-

мотці реле у разі руху якоря. Вихід помножувача 3 подано на вхід інтегратора 4, пусковий вхід якого зв'язаний із виходом блока визначення моменту зрушення якоря 17, а стоповий вхід зв'язаний із виходом блока визначення моменту удару якоря об обмежувач 17.

Входи блока 14 і блока 17 з'єднані з виходом МП 2, що містить інформацію у певному масштабі з миттєвих значень струму i_p .

Вихід блока 17 з'єднаний із стоповим входом формувача часових інтервалів 15.

Рівнозначні виходи у формувача 15 подані на вхід першого функціонального перетворювача 16

$$\frac{d^2 \varphi_p}{dt^2} \text{ і другого функціонального перетворювача 18 } \frac{d\varphi_p}{dt}.$$

Виходи функціональних перетворювачів $\frac{d^2 \varphi_p}{dt^2}$ і

$$\frac{d\varphi_p}{dt}$$

подані, відповідно на другий і третій (від'ємні) входи тривходового суматора 6. Вихід інтегратора 4 поданий на перший вхід обчислювача 15 залежності електромагнітного моменту від часу, на другий вхід якого поданий вихід третього функціонального перетворювача 19 залежності кута повороту якоря від часу, а вихід

обчислювача 5 поданий на перший вхід суматора 6, вихід якого поданий на перший вхід обчислювача 11 залежності протидійного моменту від кута повороту якоря, на другий вхід якого поданий вихід функціонального перетворювача 19. Вихід блока обчислювача 11 поданий на вхід блока 20 відображення результатів ідентифікації. Вихід МП 13 поданий також на перший вхід блока 9 визначення струму зрушення 9, на другий вхід якого поданий блок 14. Вихід блока 9 поданий на вхід блока 10 обчислення коефіцієнта запасу за струмом зрушення, вихід якого поданий на перший вхід функціонального перетворювача 19, на другий вхід якого поданий вихід формувача 15, на третій – вихід блока 23 обчислення коефіцієнта α , який враховує магнітний опір сталі в першому наближенні, на другий і третій входи якого подані рівнозначні виходи формувача 15, на четвертий вхід – вихід блока 10 визначення $K_{3,3B}$, а на перший вхід поданий вихід блока визначення постійної часу τ_p 22 електромагнітної системи за $t = t_{зр}$ і $\varphi = \varphi_1$, вхід якого зв'язаний із виходом МП 13.

Вихід блока τ_p поданий також на 4-й вхід функціонального перетворювача 19.

Вихід МП 13 також поданий на вхід запам'ятовувального пристрою 21, де у відповідній формі (аналоговій або цифровій) запам'ятовуються миттєві значення i_p струму за період

$$\Delta t = t_{уд} - t_{зр}.$$

Із пристрою 21 залежність $i_p(t)$ може бути завантажена в будь-який блок для знайдення конкретного параметра, що характеризує реле.

Блок 24 завдання конструктивних коефіцієнтів реле моменту інерції якоря J , кута розчину якоря

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1,$$

споживаної потужності

$$N_y = UI_y,$$

своїми відповідними виходами з'єднаний із входами блоків, що використовують цю інформацію.

Принцип дії пристрою-ідентифікатора механічної характеристики реле

Ідентифікатор механічної характеристики реле працює таким чином. У разі замикання контакту 7 до обмотки 12 випробовуваного реле прикладається напруга U від силового виходу КДЖ, а від його сигнального виходу напруга U подається на перший вхід двохходового суматора 2.

Протікаючи по обмотці 12 і прецизійному опорі, струм у період руху якоря (від зрушення до удару) створює на ньому падіння напруги $i_p r$. Ця напруга підсилюється в МП 13 і на його виході отримуємо напругу

$$i_p r \frac{R}{r} = i_p R.$$

Ця напруга $i_p R$ надходить на другий вхід суматора 2. У такий спосіб на виході суматора 2 утворюється сигнал $U - i_p R$. Одночасно з прецизійного опору напруга $i_p r$ через другий МП 8 із коефіцієнтом передачі $\frac{1}{r}$ формує сигнал

$i_p r \frac{1}{r} = i_p$, який надходить на другий вхід помножувача 3. На перший вхід помножувача надходить сигнал $U - i_p R$. Тоді на виході помножувача 3 утвориться сигнал $i_p (U - i_p R)$.

Цей сигнал надходить на сигнальний вхід інтегратора 4, пуском і зупинкою якого керують, відповідно, блоки 14 і 17. Вхід блока 14 у момент зрушення якоря $t_{зв}$ видає керуючий імпульс, що запускає в роботу інтегратор 4 та формувач 15. Вхід блока 17 у момент удару якоря об обмежувач $t_{уд}$ видає керуючий імпульс, що зупиняє роботу інтегратора 4 і блока 15.

Інтегратор 4 виконує операцію інтегрування сигналу, що надходить з помножувача 3, за період $\Delta t = t_{уд} - t_{зв}$,

тобто на виході отримуємо сигнал $\int_{t_{зв}}^{t_{уд}} i_p (U - i_p R) dt$, що є чисельником виразу (15),

який задає алгоритм визначення залежності електромагнітного моменту реле від кута повороту якоря. Цей сигнал і надходить на перший вхід обчислювача 5, на другий вхід якого подається вихід перетворювача 19 $\varphi_p(t)$. Обчислювач 5 здійснює розрахунок залежності електромагнітного моменту від часу за формулою

$$M_e(t_i) = \frac{d \int_{t_{зв}}^{t_{уд}} i_p(t_i) [U - i_p(t_i) R] dt}{d\varphi_p(t_i)}, \quad (18)$$

де t_i належить інтервалу $(t_{зв}, t_{уд})$.

Вираз (18) описує алгоритм роботи обчислювача 5, який найбільш ефективно (за точністю та універсальністю) реалізовувати на цифровій мікропроцесорній техніці. Переходячи від неперервної функції часу до її дискретних значень та замінюючи інтеграл у виразі (18) сумою, отримуємо:

$$M_e(t_i) = \frac{\sum_0^{i+1} i_p(t_i + \Delta t) [U - i_p(t_i + \Delta t) R]}{\varphi_p(t_i + \Delta t) - \varphi_p(t_i)} - \frac{\sum_0^i i_p(t_{pi}) [U - i_p(t_i) R]}{\varphi_p(t_i + \Delta t) - \varphi_p(t_i)},$$

де $\Delta t = \frac{t_{уд} - t_{зв}}{n}$ за достатньо великого n .

Сигнал із виходу МП 13 надходить на перший (сигнальний) вхід блока 9 визначення значення струму зрушення $I_{зр}$, на другий (керуючий) вхід якого надходить імпульс від блока 14, за допомогою якого блока 9 запам'ятовує значення струму в обмотці реле в момент зрушення.

Запам'ятовування може бути здійснено як у цифровій, так і в аналоговій формі.

З виходу блока 9 сигнал надходить на вхід блока 10 обчислення коефіцієнта запасу за струмом зрушення, вихід якого надходить на перший вхід перетворювача 19.

З першого і другого рівнозначних виходів формувача 15 сигнали, пропорційні поточному часу з проміжку

$$\Delta t = t_{уд} - t_{зв},$$

надходять на сигнальні виходи функціональних

перетворювачів 16 і 18. У першому з них $\frac{d^2\varphi_p}{dt^2}$

здійснюється перетворення вхідного сигналу за алгоритмом (14) з урахуванням конструктивних коефіцієнтів J , φ_p і N_y , що задаються блоком завдання конструктивних коефіцієнтів 24.

У другому функціональному перетворювачі $\frac{d\varphi_p}{dt}$

здійснюється перетворення вхідного сигналу за алгоритмом (13), також з урахуванням конструктивних коефіцієнтів.

Вихід функціонального перетворювача $\frac{d^2\varphi_p}{dt^2}$

поданий на другий вхід, а вихід функціонального перетворювача $\frac{d\varphi_p}{dt}$ – на третій вхід тривходового суматора 6.

Таким чином, на суматорі 6 остаточно реалізується алгоритм (17) визначення залежності протидійного моменту від часу, тому що на 1, 2 і 3-й його входи надходять перший, другий і третій доданки із правої частини виразу (14).

Вихід МП 13 (а також пристрою 21) поданий на вхід блока τ_p 22, де визначається постійна τ_p електромагнітної системи реле в момент зрушення, тобто при $t = t_{зв}$ і $\varphi = \varphi_1$ (якір у верхньому відтягнутому положенні) за алгоритмом (9).

Із сигналу $I_{уд}$ віднімається $I_{зр}$, що надходить із блока 9. Потім диференціюється за часом крива струму в обмотці в момент $t = t_{зр}$, і різниця

$I_{уд} - I_{зр}$ ділиться на $\left(\frac{di_p}{dt}\right)_{t=t_{зр}; I=I_{зр}}$. Вихід блока 9

поданий також на вхід блока τ_p .

Вихід блока τ_p подається на четвертий вхід функціонального перетворювача 19 і на перший вхід блока 23 обчислення коефіцієнта α , на другий і третій входи якого подані, відповідно рівнозначні виходи 2 і 1 формувача 15.

Сюди ж від блока завдання конструктивних параметрів задаються сигнали, пропорційні φ_p , N_y і J . Блок 23 реалізує алгоритм (11), для чого вихід блока 10 визначення коефіцієнта запасу за струмом зрушення з'єднаний з четвертим входом блока 23, вихід якого поданий на третій вхід функціонального перетворювача 19, на другий вхід якого поданий вихід формувача 15, від якого надходить сигнал поточного часу.

Сигнал від функціонального перетворювача 19, пропорційний $\varphi_p(t_i)$, надходить на другий вхід обчислювача залежності $M_{пр}(\varphi)$, де відбувається обчислення залежності $M_{пр}(\varphi)$ з використанням двох функцій часу: $M_{пр}(t)$ і $\varphi_p(t)$. При цьому час виключається як параметр.

Графічний метод визначення механічної характеристики реле

Алгоритм виключення t і побудови $M_{пр}(\varphi)$ може бути таким.

Залежності $M_{пр}(t)$ і $\varphi_p(t)$ зображено на рис. 3.

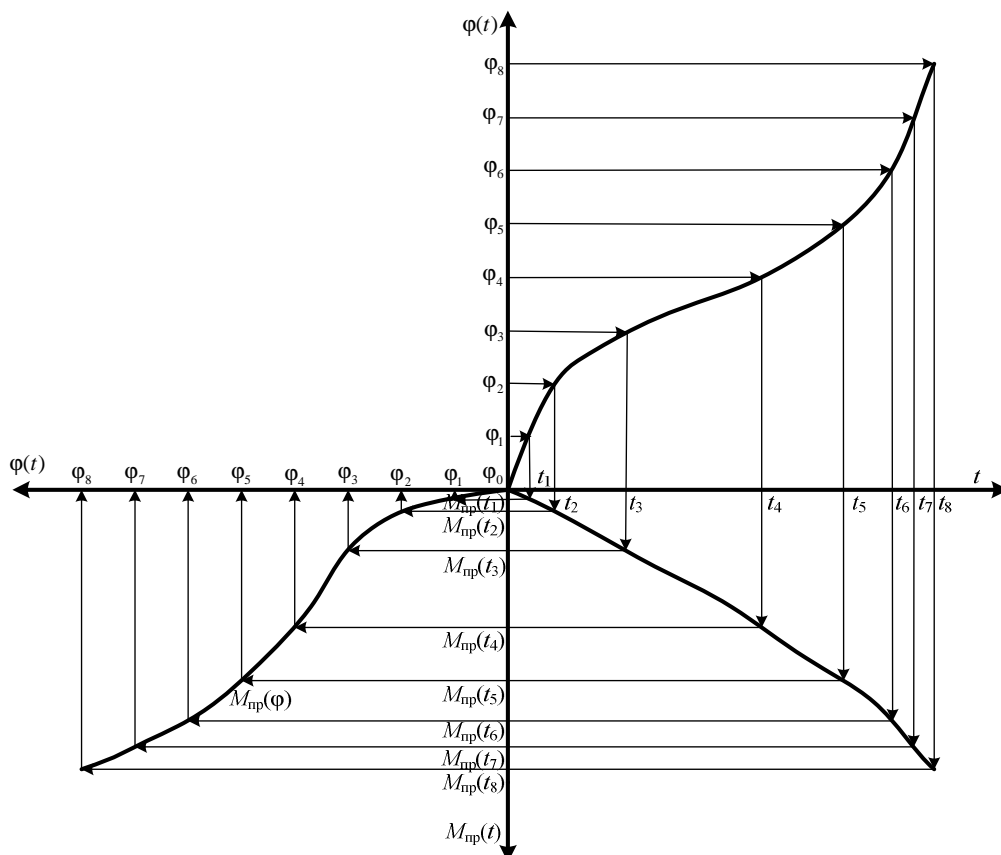


Рис. 3. Графічний метод визначення механічної характеристики реле

Діапазон зміни кута φ під час руху якоря розбиваємо на n рівних ділянок (у нашому випадку $n = 8$).

Потім визначаються моменти часу $t_0 \dots t_8$, що відповідають значенням $\varphi_0 \dots \varphi_8$.

Далі для знайдених таким чином моментів часу визначаються значення $M_{\text{пр}}(t_0) \dots M_{\text{пр}}(t_8)$.

Потім по осі абсцис (рис. 3) у відповідному масштабі відкладають значення $\varphi_0 \dots \varphi_8$, а по осі ординат – $M_{\text{пр}}(t_0) \dots M_{\text{пр}}(t_8)$.

Перетини перпендикулярів до осей, проведених із точок $M_{\text{пр}}(t_i)$ і $\varphi_{\text{пр}}(t_i)$ дають вісім точок на лінії (графіку) шуканої залежності $M_{\text{пр}}(\varphi)$.

Отриману графічну залежність $M_{\text{пр}}(\varphi)$ можна апроксимувати аналітичним виразом.

Висновки

Використання пристрою-ідентифікатора механічної характеристики реле може бути віднесене до розряду енергозберігаючих наукомістких технологій, що дають змогу з високим ступенем точності і продуктивності здійснити контроль пружних властивостей механічних елементів реле постійного струму з насиченою магнітною системою без їх розбору.

Для інженерної реалізації запропонованого пристрою потрібна розробка принципової електричної схеми та відповідного програмного забезпечення, що дасть можливість його реалізувати на сучасній елементній базі цифрової електроніки.

Література

1. Гуз Ю.Т. Систематизація типів і видів відмов електромагнітних систем авіаційного обладнання і визначення пружних властивостей елементів контактно-пружної системи / Ю.Т. Гуз // Проблеми підвищення ефективності інфраструктури: зб. наук. пр. – К.: НТУ, 2001. – Вип. 6. – С. 145–150.
2. Гуз Ю.Т. Створення математичної моделі та методики з визначенням технічного стану електромагнітних систем / Ю.Т. Гуз // Вісник Національного транспортного університету та транспортної академії України: зб. наук. пр. – К.: НТУ, 2001. – Вип. 6. – С. 315–319.
3. Гуз Ю.Т. Диагностика технических состояний магнитных контактно-подвижных и электрических подсистем в электромагнитных системах / Ю.Т. Гуз // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К.: НАН України; ИЭС им. Е.О. Патона НАН України; МА "Сварка", 2001. – № 4. С. 53–54.
4. Агарянюц Р.А. Устройство для снятия динамической электромагнитной характеристики электромагнитных элементов постоянного тока при срабатывании. А.с. СССР №789.970 М.К.И. С05В,23/02. – М., 1980 г.
5. Гуз Ю.Т. Пристрій ідентифікації механічної характеристики електромагнітних систем / Ю.Т. Гуз, С.В. Єнчев, А.О. Сильнягін // Вісник НАУ. – 2008. – № 1 (35). – С. 62–66.

Стаття надійшла до редакції 07.04.09.