

УДК 378.14 (045)

# ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ

Ю.Т. Гуз

Кандидат технічних наук, доцент\*

І.В. Прохоренко

Асистент\*

E-mail: Proshorenko\_1@mail.ru

Т.А. Мазур

Кандидат технічних наук, асистент\*

E-mail: Mazur\_T@mail.ru

С.В. Єнчев

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: esw@ukr.net

А.О. Сильнягін

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: saa5@ukr.net

\*Кафедра автоматизації та енергоменеджменту  
Аерокосмічний інститут Національного авіаційного  
університету  
пр-т Космонавта Комарова, 1 корп. 5, к. 5.107, м. Київ  
Контактний тел.: (044) 406-70-58, (044) 406-74-31

*Для підвищення ефективності процесів діагностування ЕМС в роботі запропоновано використання непрямого методу, який полягає в аналізі динамічних властивостей струму, протікаючого по обмотці реле з напругою, що змінюється деяким чином*

*Ключові слова: електромагнітна система, реле, обмотка збудження*

*Для повышения эффективности процессов диагностирования ЕМС в работе предложено использование непрямого метода, который заключается в анализе динамических свойств тока, протекающего по обмотке реле с напряжением, которое изменяется некоторым образом*

*Ключевые слова: электромагнитная система, реле, обмотка возбуждения*

*For the increase of efficiency of processes of diagnosticating of EMC the use of indirect method which consists in the analysis of dynamic properties of current is in-process offered, flow what on the puttee of relay with tension which changes some character*

*Keywords: electromagnetical system, relay, puttee of excitation*

## Вступ

Електромагнітні системи (ЕМС) є однією з найпоширеніших систем керування процесом розподілу електричної енергії, тому процесом діагностики ЕМС приділяється значна увага.

В силу того, що відомі засоби та методи діагностики ЕМС не мають широкої автоматизації технологічних процесів і дозволяють досліджувати лише окремі складові процесу керування технічного стану (ТС) ЕМС (струм, час та напругу спрацювань, зусилля зворотної пружини тощо) і в силу того, що такі типи діагностики містять у собі невиправдану громіздкість і що точність виміру продуктивності та оцінка ТС ЕМС таких процесів мають низький рівень від чого знижується показник надійності роботи ЕМС формується актуальність

роботи. Також актуальність роботи визначається тим, що існуючі технологічні процеси діагностики ЕМС не мають змоги розширити інформаційне забезпечення оцінки параметрів діагностики динамічних властивостей струму, що не дозволяє забезпечити експлуатацію прогресивними формами обслуговування.

**Ціль роботи** – є формування моделей описуючих динамічні властивості струму протікаючого в обмотці ЕМС при перехідних процесах.

## Постановка задачі

В загальному випадку, поняття ЕМС складається з: мушти гальмування електромагнітного зчеплення чи розчеплення валів агрегатів, вугільні регулято-

ри напруги, вібраційні регулятори, електромагнітні комутаційні реле та контактори, поляризовані реле, різноманітність силового електромагнітного устаткування. В силу єдності в ЕМС фізичних процесів протікаючи в цій множині виробів за об'єкт дослідження на довільній основі пропонується взяти реле постійного струму.



Рис. 1. Структурно-логічна схема електромагнітного реле при вмиканні

На рис. 1 приведена структурна схема електромагнітної системи реле, при вклученні в якій виділені електрична, магнітна і жваво-контактна системи. Електричні зв'язки показані суцільними стрілками, механічні - пунктирними, магнітні - подвійними пунктирними стрілками. Зазначимо, що якір є одночасно елементом як магнітної, так і пересувної систем.

Приведена на рис. 1 структурна схема виявиться корисною при розробці алгоритмів діагностики, тому охарактеризуємо її детально.

Від джерела енергії електроенергія поступає на обмотку реле, внаслідок чого створюється електромагнітне поле, яке проходить по замкненому шляху.

Обмотка реле - осердя - якір - повітряний зазор - яро - осердя. Внаслідок взаємодії електромагнітного поля осердя і якоря утвориться електромагнітний момент,  $M_E$  що спричиняє рушення якоря у бік зменшення повітряного зазора. Цей момент  $M_E$  через умовно (для наглядності) введени суматори  $\Sigma_1$  і  $\Sigma_2$  передається на контактну систему, що складається з нормально-замкнених і нормально-розімкнених контактів. Рушенню якоря під дією електромагнітного моменту  $M_E$  перешкоджають:  $M_{ТР}$  - момент тертя в осі підвісу якоря;  $M_{ЗП}$  - момент зворотній пружини;  $M_{НРК}$  - момент опору нормально-розімкнених контактів. Момент опору нормально-замкнених контактів  $M_{НЗК}$  діють при вклученні реле згідно з електромагнітним моментом. Аналогічну структурну схему можна привести і для режиму вимкнення реле. Відмінність буде полягати в зміні знаків моментів  $M_{НЗК}$ ,  $M_{НРК}$ .

Для ідентифікації магнітної, контактної-рухомої і електромагнітної підсистем в герметизованому (так і не тільки в герметизованому) реле можна скориста-

тися непрямим методом, що полягає в аналізі динамічних властивостей струму, який протікає в обмотці реле при напрузі, що змінюється деяким чином на його обмотці [1,2]. Практично найбільш характерними законами зміни напруги на обмотці реле є близьке до стрибкоподібного падіння напруги до нуля при вимкненні керуючої напруги і близьке до стрибко-

подібного зростання напруги при його вмиканні на постійну напругу.

Для випрацювання досить прозорої фізичної концепції, встановленого в основу такого непрямого методу контролю і діагностики реле, розглянемо тимчасову залежність струму в обмотці реле при його вмиканні і вимкненні рис. 2.

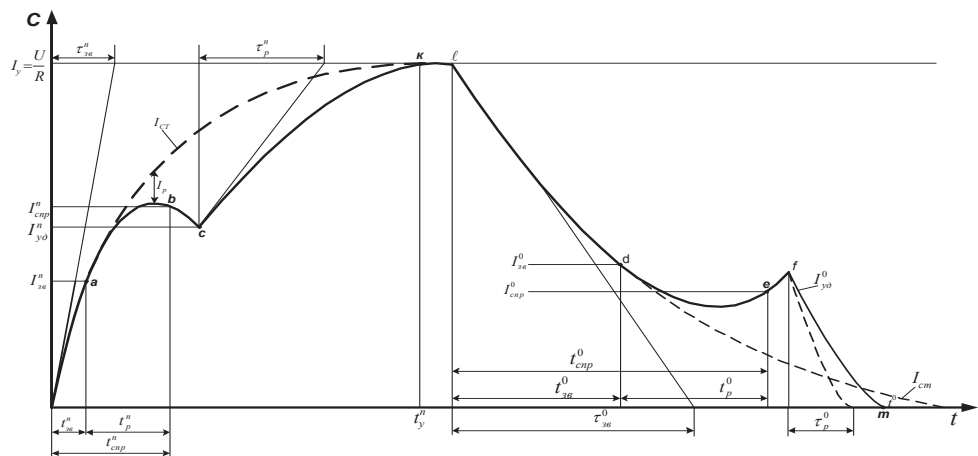


Рис.2. Тимчасова залежність струму в обмотці реле при його вмиканні і вимкненні

У початковий період зрушення, коли якір знаходиться у верхньому відтягнутому положенні і подається напруга  $U$  на обмотку реле, в течії часу зрушення  $t_{ЗР}^B$  якір залишається на місці, а струм в обмотці змінюється від точки 0 до точки а. Коли електромагнітний момент, що розвивається перевищить момент опору, приведений до осі обертання якоря, почнеться переміщення якоря.

Умова  $M_E^B > M_{ЗР}^B$  виконується, коли струм в обмотці збудження перевищує струм зрушення. З початком переміщення якоря в обмотці реле наводиться протилежна ЕРС самоіндукції, внаслідок чого швидкість наростання струму в обмотці стає меншою.

Період від точки а до точки б називається періодом зрушення, а точка б - точкою спрацювання. У точці б будуть ввімкнутими всі вимкнуті і вимкнуті всі ввімкнуті контакти. Сума часу зрушення і руху називається часом спрацювання  $t_{СПР}^B$  при вмиканні. Після спрацювання якір реле продовжує рухатися, збільшуючи контактне натискання вимкнених контактів, в точці С якір ударяється об носик осердя обмотки реле - величина струму в цей момент називається струмом удару  $I_{УД}^B$ . Від точки С до К якір нерухомий, цей період називається періодом спокою, а струм в обмотці

- струмом спокою  $I_p^B$ . Після точки К струм в обмотці називається сталим:

$$I_y = U \cdot R^{-1}.$$

Після зняття напруги з обмотки реле в момент часу якір знаходиться в нижньому притягнутому до осердя положенні. У течії періоду зрушення при відпусканні  $I_{3P}^O$  якір під дією повертаючого моменту починає рухатися, збільшуючи тим самим протидію ЕРС самоіндукції в обмотці і збільшуючи силу струму в ній. Період d - е називається періодом руху при вимиканні. У момент e (спрацювання реле при вимиканні) розмикаються всі ввімкнуті контакти. Точка f – точка удару якоря об верхній обмежувальний стопор. Від точки e до точки f якір рухається, створюючи контактне напругу ввімкнутих контактів.

Розглянемо закономірності зміни струму в обмотці при вимиканні при постійну напругу і на вимиканні реле, зміну потокозчеплення і координати рухомого якоря [3,4]. Три ці параметри - струм, потокозчеплення і кут повороту якоря - практично повністю характеризують електричну, магнітну систему і можуть бути використані для ідентифікації підсистем ЕМС.

Ввімкнення.

Період зрушення.

У періоді зрушення якір нерухомий:

$$\Phi_{3P} = \text{const}.$$

$$i_{3P}^B(t) = I_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{3P}}} \right) - I_y \frac{\alpha_{3P}}{\tau_{3P}^2} t^2; \quad (1)$$

$$\Psi_{3P}^B(t) = \tau_{3P} U \left( 1 - e^{-\frac{t}{3\tau_{3P}}} \right) + \frac{\alpha_{3P}}{6} \frac{U}{\tau_{3P}^2} t^3. \quad (2)$$

причому:

$$I_y = \frac{U}{R}; \quad (3)$$

$$\tau_{3P} = \frac{(d\Psi/di)_{t=0}}{R}; \quad (4)$$

$$\alpha_{3P} = \frac{I_x (d^2\Psi/di^2)_{t=0}}{(d\Psi/di)_{t=0}}. \quad (5)$$

тут  $(d\Psi/di)_{t=0}$  – динамічна індуктивність в періоді зрушення з якорем, що знаходиться у відтягнутому положенні, яке відповідає куту розтвіру  $\Phi = \Phi_0$  з урахуванням магнітного опору сталі магнітопроводу (МОСМП) при струмі в обмотці збудження (ОЗ) рівним нулю;

$(d^2\Psi/di^2)$  – друга похідна від магнітного потокозчеплення по струму, враховуюча МОСМП при струмі в ОЗ, рівному нулю, і при якорі у верхньому відтягнутому положенні, відповідному куту розтвіру  $\Phi = \Phi_0$ ;

$I_y$  – стале значення струму;

$R$  – омичний опір всього ланцюга;

$\tau_{3P}$  – постійна часу електричного і магнітного ланцюга в періоді зрушення при  $\Phi = \Phi_0$  і при МОСМП при струмі в ОЗ рівному нулю.

Індекс ЗР всюди характеризує період зрушення.

Період зрушення.

$$i_p = I_y - I_y \frac{(K_{3.3P} - 1)}{K_{3.3P}} e^{-\frac{t}{\tau_{3P}}} - I_y \frac{(K_{3.3P} - 1)}{6K_{3.3P}\tau_{3.3P}^3} \times$$

$$\times t^2 \left\{ 2\tau_p + [\alpha(2+3\alpha) + (K_{3.3P} - 1)(V + \theta)] t \right\} \quad (6)$$

$$\Psi_{3P}(t) = \tau_p U - \frac{\tau_p U (K_{3.3P} - K_\Psi)}{K_{3.3P}} e^{-\frac{t}{\tau_p}} + \frac{(K_{3.3P} - 1)}{24K_{3.3P}\tau_p^3} \times$$

$$\times t^3 \left\{ (8+4\alpha)\tau_p + [\alpha(2+3\alpha) + (K_{3.3P} - 1)(V + \theta)] t \right\} \quad (7)$$

$$\Phi_p(t) = \frac{(K_{3.3P} - 1)N_y}{24K_{3.3P}^2 J_{\Phi_0}} t^3 \left[ 4 + (K_{3.3P} - 2)\frac{t}{\tau_p} - 2\epsilon_p t - (K_{3.3P} - 1)\alpha \frac{t}{\tau_p} \right] \quad (8)$$

причому:

$$\tau_p = \frac{(d\Psi/di)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}{R}; \quad (9)$$

$$K_{3.3P} = \frac{I_y}{I_{3P}}; \quad (10)$$

$$I_{3P} = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{2(M_{\text{пр}})_{t=0}}{\alpha(dG_B/d\Phi)_{\Phi=\Phi_0}}}; \quad (11)$$

$$N_y = U \cdot I_y; \quad (12)$$

$$\alpha_d = K_p^2; \quad (13)$$

$$K_d = \frac{R_{\mu B}(0)}{R_{\mu P}(0)}; \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{(d^2\Psi/di^2)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}{(d\Psi/di)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}; \quad (15)$$

$$V = \frac{I_{3P}^2 (d^3\Psi/di^3)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}{(d\Psi/di)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}; \quad (16)$$

$$\theta = \frac{\tau_p^3 U (d\Psi/d\Phi)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}{(K_{3.3P} - 1)K_{3.3P}J_{\Phi_1} (d\Psi/di)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}}; \quad (17)$$

$$K_\Psi = \frac{K_{3.3P}\Psi_{3P}}{\tau_p U}. \quad (18)$$

де  $\tau_p$  – електромагнітна стала в струму зрушення з якорем у відтягнутому положенні  $\Phi = \Phi_0$ , з обліком МОСМП при струмі в ОВ, рівному струму зрушення  $I_{3P}$ ;

$(d\Phi/di)_{i=I_{3P};\Phi=\Phi_0}$  – динамічна індуктивність в періоді руху з якорем у відтягнутому положенні, відповідному куту розтвіру,  $\Phi = \Phi_0$  з обліком МОСМП при струмі в ОЗ, рівному струму зрушення  $I_{3P}$ ;

$K_{3.3P}$  – коефіцієнт запасу по струму зрушення;

$I_{3P}$  – струм зрушення;

$(M_{\text{пр}})_{t=0}$  – значення протидіючого моменту на початку періоду руху;

$N_y$  – потужність споживання реле постійного струму в стаціонарному (ввімкнутому) режимі;

$\alpha_p$  – значення коефіцієнта  $\alpha_K$  на початку періоду рушення;

$K_d$  – значення коефіцієнта  $K_K$  на початку періоду руху;

$R_{\mu B}(0)$  – магнітний опір повітря на початку періоду руху при куті розтвіру якоря  $\Phi = \Phi_0$  і при струмі в ОЗ, рівному струму зрушення  $I_{3P}$ ;

$R_{\mu P}(0)$  – магнітний опір всього магнітного ланцюга на початку періоду руху;

$J$  – момент інерції якоря;

$\alpha$  – коефіцієнт, враховуючий магнітний опір сталі в першому наближенні;

$V$  – коефіцієнт, враховуючий магнітний опір сталі у другому наближенні;

$\theta$  – коефіцієнт, враховуючий (крім іншого) зміну магнітного потоку зчеплення повітря;

$\Psi_{ЗР}$  – магнітне потокозчеплення зрушення;

$K_{\Psi}$  – коефіцієнт, що враховує не лінійність електромагнітної системи;

індекс Р всюди характеризує період руху.

Період спокою.

У періоді спокою якір впирається в нижній стопор і утримується в цьому положенні електромагнітною силою. Струм в обмотці збудження і магнітного потокозчеплення в функції часу в періоді спокою виражаються таким чином:

$$i_C^s(t) = \frac{I_y}{K_{yd}} \left[ 1 + (K_{p-1}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right) \right] - \frac{(K_{yd} - 1)^2}{6K_{yd}^2 \tau_c^3} \times \\ \times I_y t^2 \left\{ 3\alpha_C \tau_c + \left[ 4\alpha_C + \frac{(K_{yd} - 1)(3\alpha_C^2 - \sigma_C)}{K_{yd}} \right] t \right\} \quad (19)$$

$$\Psi_C^b(t) = \\ = \frac{\tau_c U}{K_{\Psi C}} \left[ 1 + (K_{yd} - 1) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right) \right] + \alpha_C \frac{(K_p - 1)^2 U}{6K_{yd}^2 \tau_c^2} t^3. \quad (20)$$

причому

$$\tau_c = \frac{(d\Psi / di)_{i=I_{yd}}}{R}; \quad (21)$$

$$\alpha_C = \frac{(d^2\Psi / di^2)_{i=I_{yd}} \cdot I_C}{(d\Psi / di)_{i=I_{yd}}}; \quad (22)$$

$$\sigma_C = \frac{(d^3\Psi / di^3)_{i=I_{yd}} \cdot I_y^2}{(d\Psi / di)_{i=I_{yd}}}; \quad (23)$$

$$K_{yd} = \frac{I_y}{I_{yd}}; \quad (24)$$

$$K_{\Psi C} = \frac{\tau_c U}{\Psi_C}. \quad (25)$$

де  $(d\Psi / di)_{i=I_{yd}}$  – динамічна індуктивність в періоді спокою з якорем, що знаходиться в нижньому притягнутому положенні, яке відповідає куту удару  $\Phi = \Phi_{yd}$  з обліком МОСМП при  $i = I_{yd}$ ;

$(d^2\Psi / di^2)_{i=I_{yd}}$  – друга похідна від магнітного потокозчеплення по струму в періоді спокою, враховуюча МОСМП при струмі в ОЗ, рівному струму удару  $i = I_{yd}$  і при якорі, що знаходиться в нижньому притягнутому положенні, відповідному куту удару;  $\Phi = \Phi_{yd}$ ;

$(d^3\Psi / di^3)_{i=I_{yd}}$  – третя похідна від магнітного потокозчеплення за струмом в періоді спокою при тих же умовах, що і  $(d^2\Psi / di^2)_{i=I_{yd}}$ ;

$\tau_c$  – постійна часу електричного і магнітного ланцюгів в періоді спокою, коли якір знаходиться в нижньому притягнутому положенні, відповідним куту удару,  $\Phi = \Phi_{yd}$  і враховується МССМП при струмі в ОЗ, рівному струму удару  $i = I_{yd}$ ;

$K_{yd}$  – коефіцієнт струму удару;

$\Psi_{yd}$  – магнітне потокозчеплення всієї електромагнітної системи на початку періоду спокою ( $\Phi = \Phi_{yd}, i = I_{yd}$ );

$K_{\Psi C}$  – коефіцієнт магнітного потокозчеплення удару в періоді спокою.

Індекс «С» характеризує період спокою.

Вимикання.

Розглядається вимикання вимкнення шляхом зняття напруги з обмотки збудження. Індекс «О» зверху букви буде означати вимикання. Індеси «ЗВ», «Р», і «С», відповідно будуть означати періоди зрушення, руху і спокою.

Можливі два варіанти вимикання реле: шунтуванням обмотки збудження; розрив ланцюга з електричною дугою.

Ми розглянемо перший варіант, який в плані експериментальної і простоти технічної реалізації представляється більш переважним.

Період зрушення.

Струм і магнітне потокозчеплення в періоді зрушення при відпущенні виражаються таким чином:

$$i_{ЗР}^0(t) = I_y e^{-\frac{t}{\tau_{т0}}} + \frac{G_{ЗР0} I_y}{2\tau_{ЗР0}^2} t^2; \quad (26)$$

$$\Psi_{ЗР}^0(t) = \Psi_y - U\tau_{т0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{т0}}} \right) - \frac{\sigma_{ЗР0} U}{\sigma \tau_{ЗР0}^2} t^3; \quad (27)$$

причому при  $t = 0$ :

$$(i)_{t=0} = I_y; (\Psi)_{t=0} = \Psi_P;$$

$$(\Phi)_{t=0} = \Phi_1; \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_{t=0} = 0;$$

$$\text{при цьому } I_y = \frac{U}{R}; \Psi_P = I_C \frac{W}{R_{\mu OT}};$$

$R_{\mu OЗР}$  – повний магнітний опір перед шунтуванням;

$$\Phi = \Phi_1 = \text{const}; L_{ЗР} = \left( \frac{d\Psi}{di} \right)_{I_y; \Phi_1}; \tau_{т0} = \frac{L_{ЗР}}{R};$$

$$G_{ЗР} = I_y \frac{(d^2\Psi / di^2)_{I_y; \Phi_1}}{(d\Psi / di)_{I_y; \Phi_1}}.$$

$G_{ЗР}$  – коефіцієнт, що враховує не лінійність електромагнітної системи в періоді зрушення при відпущенні.

Період руху.

Струм, магнітне потокозчеплення і кут повороту якоря в періоді руху при відпусканні виражається таким чином:

$$i(t) = \frac{I_y}{K_{3.3P}} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{G_P I_y}{K_{3.3P} \tau_P^2} t^2; \quad (28)$$

$$\Phi^0(t) = \Phi_1 - \frac{L_P \beta N_y}{24 K_{3.3P}^2 I \tau_{P0}} t^3 [4\tau_{P0} + (K_{3.3P} \epsilon \tau_{P0} - \sigma_{P0}) t] \quad (29)$$

$$\Psi_P^0(t) = \Psi_{3.3P} - \frac{U \tau_{P0}}{K_{3.3P}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - \frac{\sigma_{P0} U}{6 K_{3.3P}^2 \tau_{P0}^2} t^2; \quad (30)$$

задаємося даними на початку періоду руху при відпусканні прийемо:

$$(i)_{t=0} = I_{3.3P}^0; (\psi)_{t=0} = \psi_{3.3P}; (\phi)_{t=0} = \phi_1;$$

$$\left(\frac{d\phi}{dt}\right)_{t=0} = 0; (M_{\text{пр}})_{t=0} = M_{\text{пр}}(\phi_1);$$

Струм зрушення при відпусканні визначається по формулі:

$$I_{3.3P}^0 = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{2M_{\text{пр}}(\phi_1)}{L_{P0} \left(\frac{dG_B}{d\phi}\right)}} \quad (31)$$

причому

$$\alpha_{P0} = K_{P0}^2; K_{P0} = \frac{R_{\mu\beta}(\phi_1)}{R_{\mu}(I_{3.3P}^0, \phi_1)};$$

тут  $R_{\mu\beta}(\phi_1)$  – магнітний опір повітря при  $\phi = \phi_1$ ;

$R_{\mu}(I_{3.3P}^0, \phi_{3P})$  – повний магнітний опір при  $\phi = \phi_1$  і струмі зрушення при відпусканні  $I_{3.3P}^0$ .

Коефіцієнт запасу струму зрушення при відпусканні рівний:

$$K_{3.3P} = \frac{I_y}{I_{3P}^0} = I_y W \sqrt{\frac{-\alpha_{\text{до}}(dG_o/d\phi)_{\phi_1}}{M_{\text{пр}}(\phi_1)}} \quad (32)$$

причому

$$L_{P0} = \left(\frac{d\psi}{di}\right)_{I_{3.3P}^0, \phi_1}^0; \tau_{P0} = \frac{L_{P0}}{R} \quad (33)$$

$$\beta = \frac{W^2(dG_B/d\phi)_{\phi_1}}{(d\psi/di)_{I_{3.3P}^0, \phi_1}^0}; G_{P0} = \frac{I_y(d^2\psi/di^2)_{I_{3.3P}^0, \phi_1}^0}{(d\psi/di)_{I_{3.3P}^0, \phi_1}^0} \quad (34)$$

тут  $\tau_{P0}$  – постійна часу електричного і магнітного ланцюгів в періоді руху при відпусканні;

$L_{P0}$  – індуктивність всієї електромагнітної системи в періоді рушення при відпусканні з якорем, що знаходиться в нижньому притягнутому положенні  $\phi_1$  і струмі зрушення  $I_{3.3P}^0$ ;

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує зміну магнітної провідності повітря і індуктивності всієї електромагнітної системи в періоді руху при відпусканні;

$\sigma_{P0}$  – коефіцієнт, що враховує не лінійність електромагнітної системи.

Період спокою.

У періоді спокою при відпусканні якор знаходиться у верхньому притягнутому положенні і утримується в цьому положенні силою протидіючої пружини.

Початкові умови в періоді спокою при відпусканні (ПСВ).

При  $t=0$ :  $(\phi)_{t=0} = \phi_1$ ;  $(i)_{t=0} = I_{\text{вд}}^0$ ;  $(\psi)_{t=0} = \psi_{\text{вдо}}$  струм і магнітне потокозчеплення в періоді спокою виражаються як

$$i_C^0(t) = \frac{I_y}{K_{\text{вд}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{св}}}} + \frac{G_{\text{св}} I_y}{K_{\text{вд}} \tau_{\text{с}}} t^2 \quad (35)$$

$$\psi_C^0(t) = \psi_{\text{вд}} - \frac{U \tau_{\text{вд}}}{K_{\text{вд}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{св}}}}\right) - \frac{\sigma_{\text{св}} U}{K_{\text{вд}} \tau_{\text{св}}^2} t^3 \quad (36)$$

причому

$$L_{\text{св}} = \left(\frac{d\psi}{di}\right)_{I_{\text{вд}}; \phi_1}; \tau_{\text{св}} = \frac{L_{\text{св}}}{R} \quad (37)$$

$$G_{\text{св}} = I_y \frac{(d^2\psi/di^2)_{I_{\text{вд}}; \phi_1}}{(d\psi/di)_{I_{\text{вд}}; \phi_1}} \quad (38)$$

Завжди  $\tau_{\text{св}} < \tau_{\text{P0}}$ . Тому в періоді спокою при відпусканні струм і магнітне потокозчеплення змінюються більш різко, ніж в періоді р.

### Висновок

Проведене дослідження пропонує ідентифікувати підсистеми електромагнітного реле шляхом використання непрямого методу, що базується на аналізі динамічних властивостей струму протікаючого в його обмотці з зміною деяким чином напруги на ній. В основу створеного методу контролю й діагностики покладено розгляд тимчасових залежностей струму в обмотці реле для періодів зрушення, руху та спокою якоря при його вмиканні та вимиканні.

Метод, який пропонується дозволяє підвищити точність ідентифікації, зменшити час та витрати на проведення робіт та спрощує визначення його технічний стан і як підсумок може надати більш доцільний і суттєвий економічний ефект.

### Література

1. А.с. №789.970 СССР, МКИ Ст 05В. 23/02. Устройство для снятия динамической электромагнитной характеристики электромагнитных элементов постоянного тока при срабатывании [Текст] / Агаронянц Р.А., 1980г.
2. А.с. №748.354 МКИ .1G 05В, 23/02. Устройство для контроля регулировочных параметров герметизированных реле [Текст] / Копылов В.С., Кострюков С.И., М., 1980 г.
3. Агаронянц Р.А. Динамика, синтез и расчет электромагнитов. [Текст] / Р.А. Агаронянц. – М.: Наука, 1967. – 269 с.
4. Агаронянц Р.А. Электромагнитные элементы технической кибернетики. [Текст] / Р.А. Агаронянц. – М.: Наука, 1972. – 277с.