

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ

В роботі створено математичну модель, формулювання якої встановлює наукові положення щодо фізики процесів та поведінки магнітної підсистеми в кожному періоді роботи реле і методика визначень її діагностичних параметрів

Ключові слова: електромагнітна система, магнітна підсистема реле, діагностичні параметри

В работе разработана математическая модель, формулирование которой устанавливает научные положения физики процессов и поведения магнитной подсистемы в каждом периоде работы реле и методика определения ее диагностических параметров

Ключевые слова: электромагнитная система, магнитная подсистема реле, диагностические параметры

Authors propose a mathematical model, which describe the behavior of the magnetic subsystem in each period of the relay working and method of determining it's diagnostic parameters

Key words: electromagnetic system, the magnetic subsystem relays, diagnostic parameters

Ю.Т. Гуз

Кандидат технічних наук, доцент*

А.О. Сильнягін

Кандидат технічних наук, доцент*

С.В. Єнчев

Кандидат технічних наук, доцент*

І.В. Прохоренко

Асистент*

Т.А. Мазур

Кандидат технічних наук, асистент*

Кафедра автоматизації та енергоменеджменту

Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03680

Контактний тел.: (044) 406-70-58

1. Вступ

Експлуатація значної кількості електромагнітних систем та складність задач, що вирішуються за їх допомогою, визначають підвищений інтерес до їх роботоздатності та оцінки технічного стану на різних етапах життєвого циклу. Недоліки існуючих методів діагностування та прогнозування технічного стану електромагнітних виробів, а саме низький рівень точності виміру продуктивності та оцінки їх технічного стану, громіздкість і складність ідентифікації параметрів, що характеризують технічний стан виробу, складають актуальності даної роботи. Складність економічної ситуації вимагає експлуатувати застаріле обладнання і рекомендує зламати ситуацію на краще шляхом

вдосконалення існуючих методів та засобів процесів діагностики, за рахунок чого пропонується досягти зниження витрат та підвищення рівня надійності роботи електромагнітних систем, що також дозволяє з певною позитивною визначеністю віднести до актуальності роботи.

Метою роботи є створення математичної моделі та методики розрахунку діагностичних параметрів магнітного ланцюга електромагнітних систем.

2. Основні аспекти проблеми

Будемо вважати, що в нашому розпорядженні є зареєстрована залежність струму $i(t)$ в обмотці збуд-

ження від часу при вмиканні реле на постійну напругу U .

Задачу будемо розглядати в нелінійній постановці, тобто з урахуванням нелінійності характеристики намагнічення сталі магнітопровода.

У періоді зрушення якорі нерухомий.

Струм i та магнітне потокозчеплення задаються виразами [3]:

$$i_{зр} = I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} \right) - I_y \frac{\alpha_{зр}}{2\tau_{зр}^2} t^2, \quad (1)$$

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

де $i_{зр}$ - значення струму зрушення якоря, I_y - стале значення струму, $\alpha_{зр}$ - значення коефіцієнту α_k на початку руху якоря, $\tau_{зр}$ - постійна часу електромагнітного ланцюга, $\Psi_{зр}$ - магнітне потокозчеплення в період зрушення, U - постійна напруга живлення реле.

Причому

$$I_y = U/R, \quad (3)$$

$$\tau_{зр} = \frac{(d\Psi/dt)_{t=0}}{R}, \quad (4)$$

$$\alpha_{зр} = \frac{(d^2\Psi/di^2)_{t=0} \cdot I_y}{(d\Psi/di)_{t=0}}, \quad (5)$$

де $(d\Psi/di)_{t=0}$ - динамічна індуктивність, $(d^2\Psi/di^2)_{t=0}$ - друга похідна від магнітного потокозчеплення за струмом, R - омичний опір всього ланцюга.

Значимо, що вирази (1) і (2) відрізняються від отриманих експериментально залежностей не більш ніж на 1,5%. Тому спробуємо на основі рівнянь (1) і (2) вивести параметри електромагнітної системи, які можуть служити як діагностичні.

Перші два параметри, що характеризують електромагнітну систему реле - це $\tau_{зр}$ і $\alpha_{зр}$. Пам'ятаємо, що в нашому розпорядженні є лише експериментальна залежність $i(t)$.

Диференціюючи за часом рівняння (1), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{d}{dt} \left[I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} \right) - I_y \frac{\alpha_t}{2\tau_{зр}^2} t^2 \right] = \\ &= I_y \left[-e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} \left(-\frac{1}{\tau_{зр}} \right) - \frac{\alpha_t}{\tau_{зр}^2} t \right], \\ \frac{di}{dt} &= I_y \left[-e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} \left(-\frac{1}{\tau_{зр}} \right) - \frac{\alpha_t}{\tau_{зр}^2} t \right], \end{aligned} \quad (6)$$

де α_t - коефіцієнт, що враховує магнітний опір сталі в першому наближенні.

Знайдемо теоретичний вираз для di/dt при $t=0$

$$(di/dt)_{t=0} = \frac{I_y}{\tau_{зр}} \quad (7)$$

Разом з тим експериментально ми можемо за кривою перехідного струму визначити дотичну до цієї кривої на початку координат (рис. 1).

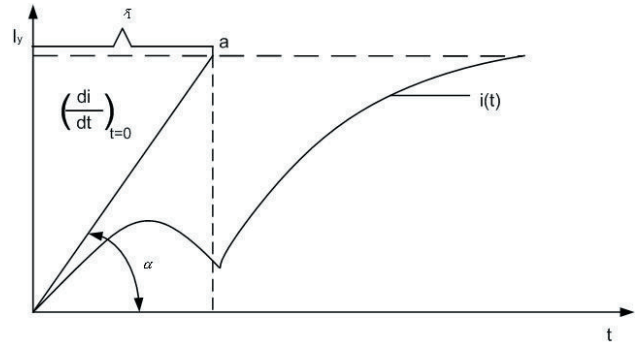


Рис. 1. Визначення дотичної до кривої перехідного струму

Дотична до експериментальної кривої струму $i(t)$ при $t=0$ перетне лінію сталого значення струму I_y в деякій точці a . Відстань від осі ординат (осі струму) до точки a позначимо як τ_1 . Отже, похідна від фактичної кривої струму за часом при $t=0$ запишеться як $\text{tg} \alpha \frac{I_y}{\tau_1}$.

Тобто можна записати:

$$(di/dt)_{t=0} = \frac{I_y}{\tau_1}. \quad (8)$$

Далі визначимо $d\Psi/di$. Запишемо вираз для $d\Psi/dt$ як:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (9)$$

звідки

$$\frac{d\Psi}{di} = \frac{d\Psi/dt}{di/dt}. \quad (10)$$

Знайдемо вираз для $d\Psi/dt$:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} &= \frac{d}{dt} \left[\tau_{зр} U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} \right) + \frac{\alpha_t}{6} \frac{U}{\tau_{зр}^2} t^3 \right] = \\ &= -\tau_{зр} U e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} \left(-\frac{1}{\tau_{зр}} \right) + \frac{\alpha_t U}{2\tau_{зр}^2} t^2, \\ \frac{d\Psi}{dt} &= U \left[e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} + \frac{\alpha_t}{2\tau_{зр}^2} t^2 \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Підставивши (6) і (11) в (10), отримуємо:

$$\frac{d\Psi}{di} = R \cdot \frac{2\tau_{зр}^2 e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} + \alpha_{зр} t^2}{2(\tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} - \alpha_{зр} t)}. \quad (12)$$

При $t=0$

$$(d\Psi/di)_{t=0} = R\tau_{зр}. \quad (13)$$

З іншого боку, з рівняння (11) випливає, що

$$(d\Psi/dt)_{t=0} = U, \quad (14)$$

$$\text{та } \left(\frac{d\Psi}{di} \right)_{t=0} = \frac{(d\Psi/dt)_{t=0}}{(di/dt)_{t=0}}. \quad (15)$$

Підставимо в (15) праві частини рівнянь (14) та (8):

$$\left(\frac{d\psi}{di}\right)_{t=0} = \frac{U}{I_y/\tau_1} = \frac{U\tau_1}{I_y} = R\tau_1. \quad (16)$$

Прирівнюючи рівняння (13) і (16), отримуємо рівність $R\tau_{зр} = R\tau_1$, звідки

$$\tau_{зр} = \tau_1. \quad (17)$$

Таким чином, ми отримали дуже важливе, з точки зору експериментального визначення параметрів електромагнітної системи співвідношення (17): постійна часу електромагнітного ланцюга реле $\tau_{зр}$ в періоді зрушення при $t=0$ дорівнює абсцисі перетину графіка похідної струму в обмотці за часом з ординатою сталого струму в цій обмотці.

Для експериментального визначення величини τ_1 та, відповідно, $\tau_{зр}$ необхідно розв'язати рівняння:

$$(di/dt)_{t=0} \cdot \tau_1 = I_y, \quad (18)$$

звідки отримуємо τ_1 :

$$\tau_1 = \tau_{зр} = \frac{I_y}{(di/dt)_{t=0}}, \quad (19)$$

де $(di/dt)_{t=0}$ визначається експериментально одним з методів чисельного диференціювання.

Щоб повністю охарактеризувати $i_{зр}$ в періоді зрушення, окрім знайденого експериментально-розрахунковим шляхом $\tau_{зр}$ необхідно знайти $\alpha_{зр}$ (5):

$$\alpha_{зр} = \frac{(d^2\psi/di^2)_{t=0} \cdot I_y}{(d\psi/di)_{t=0}}.$$

Скористаємося рівнянням (10): $\frac{d\psi}{di} = \frac{d\psi/dt}{di/dt}.$

Для знаходження другої похідної за струмом від магнітного потокозчеплення запишемо:

$$\frac{d^2\psi}{di^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\psi/dt}{di/dt} \right). \quad (20)$$

За правилом диференціювання часткового двох функцій: $\frac{d\psi}{dt}$ та $\frac{di}{dt}$, отримаємо:

$$\frac{d^2\psi}{di^2} = \frac{\frac{d^2\psi}{dt^2} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{d^2i}{dt^2}}{\left(\frac{di}{dt}\right)^3}. \quad (21)$$

Використовуємо вирази (6) і (11) для, відповідно, $\frac{di}{dt}$ і $\frac{d\psi}{dt}$ шляхом диференціювання:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} = U \frac{-\tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} + \alpha_{зр} t}{\tau_{зр}^2}, \quad (22)$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} = I_y \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} - \alpha_{зр} t}{\tau_{зр}^2}. \quad (23)$$

Тоді, у відповідності до (21) отримуємо:

$$\frac{d^2\psi}{di^2} = \frac{U \frac{\alpha_{зр} t - \tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}}}{\tau_{зр}^2} \cdot I_y \frac{\tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} - \alpha_{зр} t}{\tau_{зр}^2} + I_y \frac{e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} + \alpha_{зр} t}{\tau_{зр}^2} \cdot U \frac{\alpha_{зр} t^2 + 2\tau_{зр}^2 e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}}}{\tau_{зр}^2}}{I_y^3 \left(\frac{\tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} - \alpha_{зр} t}{\tau_{зр}^2} \right)^3} = \frac{U I_y \tau_{зр}^2}{I_y^3} \frac{-2(\alpha_{зр} t - \tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}})^2 + 2\tau_{зр}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{зр}}} \alpha_{зр}^2 t^2 + 2\alpha_{зр} \tau_{зр}^2 e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}}}{2(\tau_{зр} e^{-\frac{t}{\tau_{зр}}} - \alpha_{зр} t)^3} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\psi^2}{di^2}\right)_{t=0} &= \frac{U}{I_y^2} \tau_{зр}^2 \frac{-2\tau_{зр}^2 + 2\tau_{зр}^2 + 2\alpha_{зр} \tau_{зр}^2}{2^3} = \\ &= \frac{U}{I_y^2} \tau_{зр}^2 \frac{2\alpha_{зр} \tau_{зр}^2}{2\tau_{зр}^3} = \frac{U}{I_y^2} \frac{2\alpha_{зр} \tau_{зр}^4}{2\tau_{зр}^3} = \frac{U}{I_y^2} \alpha_{зр} \tau_{зр} = \frac{R}{I_y} \alpha_{зр} \tau_{зр} \end{aligned}$$

Підставляючи (24) та (16) в (5), отримаємо:

$$\alpha_{зр} = \frac{\frac{R}{I_y} \cdot \alpha_{зр} \cdot \tau_{зр} \cdot I_y}{R\tau_{зр}} = \alpha_{зр}.$$

Таким чином, маємо очевидну тотожність:

$$\alpha_{зр} = \alpha_{зр}, \quad (25)$$

що свідчить про неможливість використання параметра, $\tau_{зр} = \tau_1$, який визначається експериментально для аналітичного розрахунку параметра $\alpha_{зр}$. Тому залишається можливим шлях визначення $\alpha_{зр}$ - чисельна апроксимація $i_{зр}(t)$ за допомогою виразу (5), де параметр $\alpha_{зр}$ підбирається, наприклад, за методом найменших квадратів так, щоб забезпечувався максимальний збіг кривих фактичного і розрахункового струму в період зрушення.

Одна з головних цілей проведених досліджень полягає в створенні методики визначення струму зрушення $I_{зр}$, що є одним з найважливіших параметрів реле.

Зіставляючи аналітичні вирази для струму в період зрушення $i_{зр}(t)$ і в період руху $i_p(t)$ можна помітити, що, по-перше, з початком руху якоря швидкість наростання струму меншає, і, по-друге, не визначивши $I_{зр}$ не можливо аналітично описати $i_p(t)$.

Для пояснення варіанту методики визначення $I_{зр}$ звернемося до рис. 2. Згідно рисунку видно, що якби ми змогли продовжити криву струму зрушення у часі правіше за момент зрушення якоря $t_{зр}$ і потім від значень цього розрахункового (уявного) струму відняли б значення дійсного струму (тобто струму в період руху), то визначення моменту зрушення, а, отже, і значення струму зрушення $I_{зр}$ вже не склало б принципових труднощів.

Визначимо: $\bar{i}_{зр}(t)$ - розрахунковий струм зрушення, τ - деяке бажане мале наперед задане число.

Тоді значення струму зрушення реле $I_{зр}$ можна визначити в момент часу, $t_{зр}$ коли виконується нерівність:

$$\Delta i(t) = \bar{i}_{зр}(t_{зр}) - i_p(t_{зр}) > \varepsilon, \quad (26)$$

і значення $I_{зр}$ визначається виразом (1), де замість t треба використати значення $t_{зр}$.

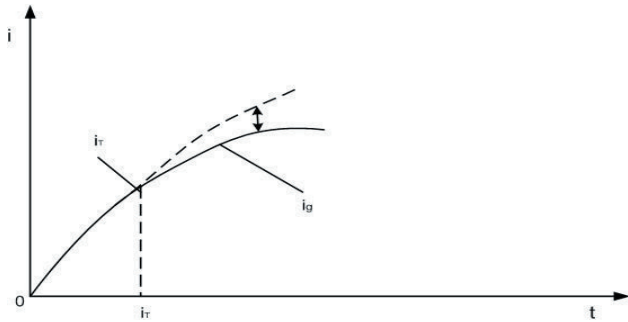


Рис. 2. До визначення струму зрушення

Визначивши таким чином час і значення струму зрушення, можна приступати до визначення динамічних електромагнітних характеристик в періоді руху.

У відповідності до визначення параметрів магнітного ланцюга, алгоритм визначення $\tau_{зр}$, $\alpha_{зр}$ і $I_{зр}$ набуває наступного вигляду (рис. 3), де $\alpha_{зр}^i$ - нульове наближення параметра $\alpha_{зр}$; m - задане число, що характеризує похибку апроксимації; $\alpha_{зр}^i$ - кінцеве значення, $\alpha_{зр}$ що задовольняє умову (6).

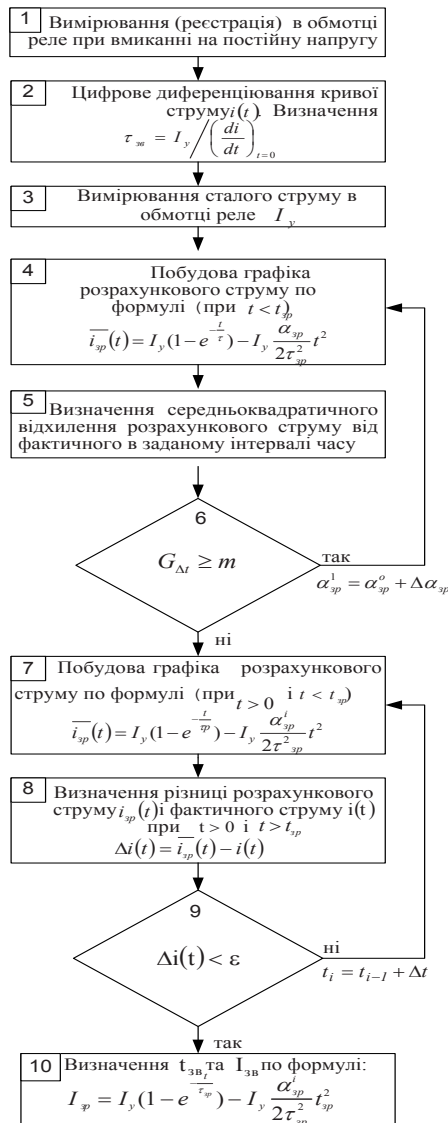


Рис. 3. Алгоритм визначення $\tau_{зр}$, $\alpha_{зр}$ та $I_{зр}$

У період руху

Коли нам відомі момент зрушення і струм зрушення, то ми маємо можливість експериментально визначити похідну за часом від струму в обмотці реле і спробувати пов'язати її з параметром τ_p - постійної часу електромагнітного ланцюга при $i=I_{зр}$ і якорем, що знаходиться у верхньому відтягнутому положенні.

Відповідно до визначення:

$$\tau_p = \frac{(d\psi/di)_{i=I_{зр}, \varphi=\varphi_1}}{R} \tag{27}$$

Форма запису повністю повторює форму запису для $\tau_{зр}$. Тому, можна показати, що τ_p визначається рівнянням:

$$\frac{I_y - I_{зр}}{\tau_p} = \left(\frac{di_p(t)}{dt} \right)_{t=t_{зр}, i=I_{зр}} \tag{28}$$

$$\tau_p = \frac{I_y - I_{зр}}{\left(\frac{di_p(t)}{dt} \right)_{t=t_{зр}, i=I_{зр}}} \tag{29}$$

Рівняння (28) проілюструємо за допомогою рис. 4:

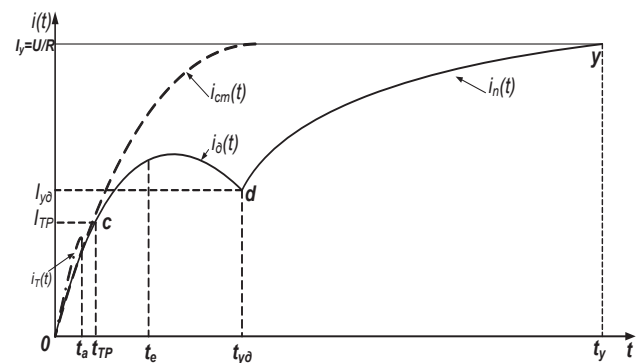


Рис. 4. Визначення похідної струму за часом

З рис. 4. видно, що похідна струму за часом дорівнює тангенсу кута дотичної, який дорівнює $\frac{I_y - I_{зр}}{\tau_p}$. Підсумовуючи проведені міркування складемо перелік параметрів, які вже можна визначити за кривою перехідного струму: значення струму зрушення якоря $I_{зр}$, електромагнітну сталу в період зрушення при вмиканні $\tau_{зр}^B$, коефіцієнт, що враховує магнітний опір сталі в період зрушення якоря при вмиканні контактів $\alpha_{зр}^B$, час зрушення якоря при вмиканні контактів $\tau_{зр}^B$, час руху якоря процесу вмикання τ_p^B , коефіцієнт запасу за струмом зрушення $K_{ззр} = \frac{I_y}{I_{зр}}$, струм спрацювання пр. вмиканні контактів $I_{сп}$.

Неважко уявити, як визначити струм спрацювання ввімкнутого і вимкнутого контакту. Для цього фіксуємо значення струму в обмотці в моменти вмикання і, відповідно, вмикання контактів при вклученні.

У періоді руху кут повороту якоря в функції часу $\varphi_p(t)$ змінюється наступним чином [1,3]:

$$\varphi_p(t) = \frac{(K_{з.зр} - 1)N_y}{24 \cdot K_{з.зр}^2 J \varphi_1} t^3 \left[4 + (K_{з.зр} - 2) \frac{t}{\tau_p} - 2\varepsilon_p t - (K_{з.зр} - 1) \alpha \frac{t}{\tau_p} \right] \quad (30)$$

де: $K_{з.зр} = \frac{I_y}{I_{зр}}$; $N_y = U \cdot I_y$ - потужність, споживана реле постійного струму в стаціонарному замкненому режимі; τ_p - електромагнітна постійна при умові $\varphi = \varphi_1$ та $I = I_{зр}$; $\varepsilon_p = 0,6K_{з.зр}^2$ - коефіцієнт демпфування; t - поточний час, J - момент інерції якоря, φ_1 - кут, що відповідає верхньому відтягнутому положенню якоря.

$$\alpha = \frac{(d^2\psi/di^2)_{i=I_{зр}, \varphi=\varphi_1} \cdot I_{зр}}{(d\psi/di)_{i=I_{зр}, \varphi=\varphi_1}}$$

За нашим уявленням, аналітичне отримання α практично настільки складне, що навряд чи доцільне.

З наведеного рівняння тепер нам відомі всі параметри окрім α - коефіцієнта, що враховує магнітний опір сталі. Цей параметр можна визначити наступним чином: час руху якоря - від моменту руху до моменту удару, піддається визначенню за кривою перехідного струму з використанням вищенаведеного алгоритму (рис. 3) і врахуванням тієї обставини, що в момент удару різко змінює знак з негативного на позитивний похідна струму за часом.

Час руху якоря:

$$t_d = t_{уд} - t_{зр} \quad (31)$$

де t_d - поточне значення часу в період руху якоря, $t_{уд}$ - значення часу удару якоря об носик осердя, $t_{зр}$ - значення часу зрушення якоря.

За цей час якір повернеться на кут:

$$\Delta\varphi = \varphi_d - \varphi_1 \quad (32)$$

Введемо наступні позначення:

$$\frac{(K_{з.зр} - 1)N_y}{24K_{з.зр}^2 J \varphi_1} = m \quad (33)$$

$$K_{з.зр} - 2 = n \quad (34)$$

$$K_{з.зр} - 1 = n + 1 \quad (35)$$

Підставивши (33) і (32) в (31), отримуємо:

$$\Delta\varphi = 4mt_d^3 + mt_d^4 \left[\frac{n}{\tau_d} - 2\varepsilon_d - \frac{(n+1)\alpha}{\tau_d} \right] \quad (36)$$

З виразу (36) нескладно виразити α :

$$\alpha = \frac{n - 2\varepsilon_d \tau_d - \frac{(\Delta\varphi - 4mt_d^3)\tau_d}{mt_d^4}}{n+1} \quad (37)$$

Підставивши потім значення α з (37) в (5), отримуємо залежність кута повороту якоря від часу.

Тепер зіставляючи моменти розмикання ввімкнутих і вимкнутих контактів з розрахованим за формулою (37) графіком залежності кута повороту якоря від

часу, можемо отримати значення кутів повороту якоря, при яких відбувається комутація контактів (рис. 5).

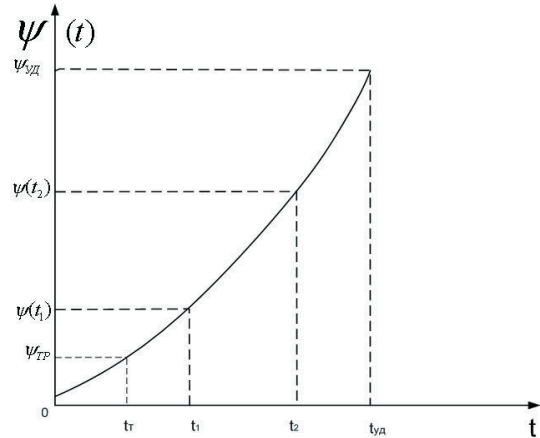


Рис. 5. Визначення значень кутів повороту якоря при комутації контактів

У процесі збільшення наробітку точки, $\varphi_{зр}$, $\varphi(t_1)$ і $\varphi(t_2)$ можуть збігатися.

Величини $\varphi_{зр} - \varphi(t_1)$, $\varphi(t_2) - \varphi(t_1)$ і $\varphi_{уд} - \varphi(t_2)$ будуть характеризувати одну з сторін пружних контактних пружин (розчин, провал).

Період спокою

У періоді спокою якір впирається в носик осердя і утримується в цьому положенні електромагнітною силою.

Струм в обмотці збудження в періоді спокою $i_c(t)$ можна виразити наступним рівнянням:

$$i_c(t) = \frac{I_y}{K_{уд}} \left[1 + (K_{уд} - 1) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right) - \frac{(K_{уд} - 1)^2}{6K_{уд}^2 \tau_c^3} I_y t^2 \left\{ 3\alpha_c \tau_c + \left[4\alpha_c + \frac{(K_{уд} - 1)(3\alpha_c^2 - \sigma_c)}{K_{уд}} \right] t \right\} \right] \quad (38)$$

де

$$\tau_c = \frac{(d\psi/di)_{i=I_{уд}}}{R} \quad (39)$$

$K_{уд}$ - коефіцієнт запасу за струмом удару, α_c - коефіцієнт, що враховує магнітний опір сталі в першому наближенні в періоді спокою, σ_c - значення середньоквадратичного відхилення, τ_c - постійна часу електричного і магнітного ланцюгів в періоді спокою, $(d\psi/di)_{i=I_{уд}}$ - динамічна індуктивність в періоді спокою з якорем, що знаходиться в нижньому притягнутому положенні, яке відповідає куту удару ($\varphi = \varphi_{уд}$), враховується магнітний опір сталі магнітопроводу при струмі $i = I_{уд}$:

$$\alpha_c = \frac{(d^2\psi/di^2)_{i=I_{уд}} \cdot I_y}{(d\psi/di)_{i=I_{уд}}} \quad (40)$$

$$\sigma_c = \frac{(d^3\psi/di^3)_{i=I_{уд}} \tau_c}{(d\psi/di)_{i=I_{уд}}} \cdot I_y^2 \quad (41)$$

$$K_{уд} = \frac{I_y}{I_{уд}} \quad (42)$$

Аналіз виразів (40)-(42) показує, що постійну часу електромагнітного ланцюга в періоді спокою τ_c можна визначити з рівняння:

$$\frac{I_y - I_{уд}}{\tau_c} = \left(\frac{di_c(t)}{dt} \right)_{t=t_{зд}, i=I_{зд}}, \tag{43}$$

звідки

$$\tau_c = \frac{I_y - I_{уд}}{\left(\frac{di_c(t)}{dt} \right)_{t=t_{зд}, i=I_{зд}}}. \tag{44}$$

Важливою характеристикою обмотки збудження реле є стан міжвиткової ізоляції, порушення якої може призвести до міжвиткового перемикавання, тобто фактично - до зменшення числа витків із струмом.

Для реле з ненасиченим магнітопроводом справедливе наступне співвідношення між магнітним потокозчепленням, струмом і кутом повороту якоря [1]:

$$\psi = \frac{C}{\phi_o - \phi} \cdot i, \tag{45}$$

де $C = \frac{W^2 \mu_o S_{1e}}{2}$ - конструктивний коефіцієнт реле, що піддається розрахунку або визначенню; S_{1e} - перетин (m^2) еквівалентної лінеаризованої магнітної системи реле, ϕ_o - кут розтвору якоря.

Продиференціюємо обидві частини рівності (45):

$$d\psi = \frac{C}{\phi_o - \phi} \cdot di \tag{46}$$

При зрушенні, коли $t = 0$:

$$d\psi = \frac{C}{\phi_o} \cdot di_{зр}. \tag{47}$$

Звідки

$$\left(\frac{d\psi}{di_{зр}} \right)_{t=0} = \frac{C}{\phi_o}. \tag{48}$$

Вище показано, що при зрушенні справедливе співвідношення:

$$\left(\frac{d\psi}{di_{зр}} \right)_{t=0} = R\tau_c. \tag{49}$$

Підставляючи (49) в (48), отримаємо:

$$R\tau_{зр} = \frac{W^2 \mu_o S_{1e}}{2\phi_o}, \tag{50}$$

тобто

$$\tau_{зр} = \frac{W^2 \mu_o S_{1e}}{2R\phi_o}. \tag{51}$$

Параметри μ_o , S_{1e} , ϕ_o в процесі експлуатації реле практично незмінні. Це означає, що постійна часу τ_c (для даних умов) прямо пропорційна числу активних обмоток і обернено пропорційна активному (омічному) опору обмотки. Якщо активний опір R піддається вимірюванню, то кількість витків можна визначати лише непрямым методом. З (51) виразимо фактичне число витків:

$$W = \sqrt{\frac{2R\phi_o\tau_{зр}}{\mu_o S_{1e}}} \tag{52}$$

Тоді кількість перемкнутих витків можливо виразити наступним чином:

$$\Delta W = W_0 - \sqrt{\frac{2R\phi_o\tau_{зр}}{\mu_o S_{1e}}} \tag{53}$$

де W_0 - початкове число витків в обмотці збудження реле.

Визначення фактичного числа витків та замкнутих накоротко витків в обмотці реле за допомогою вищезазначеного непрямого методу дозволяє різко підвищити якість діагностики обмоток реле постійного струму, що в свою чергу підвищує рівень безпеки експлуатованої техніки і надасть значний економічний ефект.

Висновок

Створене теоретичне обґрунтування та методика розрахунку з визначення магнітних ланцюгів електромагнітних систем. Поставлена задача розглядається в нелінійній постановці з врахуванням нелінійності характеристики намагнічування сталі магнітопроводу, що дозволяє лише за кривою перехідного струму визначити залежності: моменту протидії контактнорухомої підсистеми за часом та кутом повороту якоря, моменту ввімкнутих та вимкнутих контактів за кутом повороту якоря та залежність моменту зворотної пружини за кутом повороту якоря, електромагнітну сталу при вмиканні реле в період зрушення та відношення $\alpha = \frac{(d^2\psi/di^2)_{t=0} \cdot I_u}{(d\psi/di)_{t=0}}$, значення струму та часу під час зрушення якоря, значення електромагнітної сталі при вмиканні реле під час руху якоря, коефіцієнта запасу струму зрушення, струму зрушення та кількості накоротко замкнених витків обмотки реле.

Література

1. Агароняц Р.А. Электромагнитные элементы технической кибернетики [Текст] / Р.А. Агароняц. - М.: Наука, 1972. - 277с.
2. А.с. №789.970 СССР, МКИ Ст 05В. 23/02. Устройство для снятия динамической электромагнитной характеристики электромагнитных элементов постоянного тока при срабатывании [Текст] / Агароняц Р.А., 1980г.
3. Казак В.М. Діагностика обмоток електромагнітних систем постійного струму [Текст] / В.М. Казак, Ю.Т. Гуз // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій:Зб.наук.пр.- Дніпропетровськ. - 2001.-Том 5. - С.125-129.