

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИМИКАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЛЕ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Аерокосмічний інститут Національного авіаційного університету

Розроблено метод та структурну схему пристрою з визначення діагностичних параметрів процесу вимикання електромагнітного реле з урахуванням електричної дуги, що утворюється.

Постановка проблеми

Існуючі технологічні процеси діагностики електромагнітних систем (ЕМС) не мають змоги розширити інформаційне забезпечення оцінки параметрів діагностики параметрами динамічних властивостей струму, не мають широкої автоматизації технологічних процесів, що в певній мірі не дозволяє забезпечити експлуатацію авіаційного обладнання (АО) прогресивними формами обслуговування та підвищення рівня надійності роботи ЕМС і в цілому безпеку польотів повітряних суден (БППС).

Аналіз останніх досліджень

Розвитку рішенню даної проблеми сприяли такі вчені: Ройзен В. З., Вігенбург М. І., Зінов'єв Н. А., Борисов В. А., Копилов В. С., Бабіков М. А., Абаджев З. М., Агараняц Р. А., та інші.

Низький рівень точності визначення часу і значення струму зрушення при вимиканні ЕМС, громіздкість та складність виконання і розрахунок пристрою на один типовий розмір реле є невирішеною раніше частиною загальної проблеми.

Формулювання цілей статті

Ціллю наведеної статті є підвищення точності визначення часу і значення струму зрушення при вимиканні реле постійного струму з урахуванням утвореної між його контактами електричної дуги.

Основні аспекти проблеми

Теоретичне обґрунтування методу і алгоритму поставленого в основу роботи пристрою базується на допущенні, що в

нашому розпорядженні є певним чином зареєстрована залежність струму $i(t)$ в обмотці збудження реле від часу при вимиканні і падіння напруги на електричній дузі $U_P(t)$, виникаючій при розмиканні контакту в ланцюгу обмотки збудження.

Струм і магнітне потокозчеплення в періоді зрушення при відпусканні співвідносяться так:

$$i_{\text{ДЗВО}}(t) = I_y + K_{\text{ДЗВО}} I_y (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ДЗВО}}}}) + \frac{(\sigma_{\text{ДЗВО}} K_{\text{ДЗВО}}^2 + K_{\text{ДЗВО}}) t^2}{2\tau_{\text{ДЗВО}}^2} \quad (1)$$

$$\psi_{\text{ДЗВО}}(t) = \psi_y + K_{\text{ДЗВО}} U \tau_{\text{ДЗВО}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ДЗВО}}}}) - \frac{K_{\text{РЗВО}} U}{6\tau^2} t^2 \{ [K_{\text{ДЗВО}}(1 + K_{\text{ДЗВО}}) + \sigma_{\text{ДЗВО}} K_{\text{ДЗВО}} + K_{\text{ПТО}} K_{\text{ДЗВО}}] t - 3K_{\text{ДЗВО}} \tau_{\text{ДЗВО}} \} \quad (2)$$

де

$$K_{\text{ДЗВО}} = \frac{U_P(I_y)}{U};$$

$$R_{\text{ДЗВО}} = \left(\frac{dU_P}{di} \right)_{I_y};$$

$$K_{\text{ДЗВО}} = \frac{R_{\text{ДЗВО}}}{R}; \quad K_{\text{ПТО}} = \frac{I_y \left(\frac{d^2 U_P}{di^2} \right)_{I_y}}{R}.$$

Тут $K_{\text{ДЗВО}}$ – коефіцієнт напруги дуги на початку періоду зрушення при відпусканні (ППЗВО);

$R_{\text{ДЗВО}}$ – динамічний опір електричної дуги в ППЗВО;

$K_{\text{ДЗВО}}$ – коефіцієнт динамічного опору електричної дуги в ППЗВО;

$K_{пто}$ – коефіцієнт нелінійності дуги в ППЗВО, що враховує нелінійність дуги у другому наближенні;

$$I_y = \frac{U}{R}; \quad \psi_y = I_y W / R \mu_{озв}$$

$R \mu_{озв}$ – повний магнітний опір при нижньому притягнутому положенні якоря і струмі в обмотці збудження I_y в момент перед вимиканням;

Доведено, що постійна часу електромагнітної системи $\tau_{рзво}$ в періоді при $t=0$ може бути знайдена з рівняння:

$$\tau_{дзво} = \frac{I_y}{\left(\frac{di_{дзво}}{dt}\right)_{t=0}}$$

Значення $\left(\frac{di_{дзво}}{dt}\right)_{t=0}$ визначається

експериментально одним із методів чисельного диференціювання. Для знайдення числових значень коефіцієнтів $K_{дзво}$ і $K_{пто}$ необхідно зареєструвати падіння напруги на електричній дузі синхронно з перехідним струмом в обмотці збудження, побудувати динамічну вольт-амперну характеристику електричної дуги, і продиференціювати цю вольт-амперну характеристику при умовах $i_{дзво}=I_y, t=0$. Єдиний параметр у виразі (1), який не піддається ні аналітичному, ні експериментальному визначенню це $\sigma_{рзво}$

Шляхом визначення $\sigma_{дзво}$ може бути чисельна апроксимація кривої струму $i_{дзво}(t)$ ($0 < t < t_{дзво}$) (рис. 1) з використанням залежності (1), в якій параметр $\sigma_{дзво}$ визначається за методом найменших квадратів так, щоб забезпечити максимальний збіг кривих фактичного і розрахункового (при різних $\sigma_{дзво}$) струму в періоді зрушення. З проведеного аналізу виходить, що в пристрої, повинні бути диференціатор, блок апроксимації кривої струму в періоді зрушення за методом найменших квадратів, блок визначення часу і величини струму зрушення.

Оскільки вимкнення реле супроводиться електричною дугою між контактами, в пристрої повинні бути вимірник перепаду напруги на електричній дузі, запам'ятовуючий пристрій цього перепаду напруги, обчислювач динамічної

вольт-амперної характеристики і другий диференціатор.

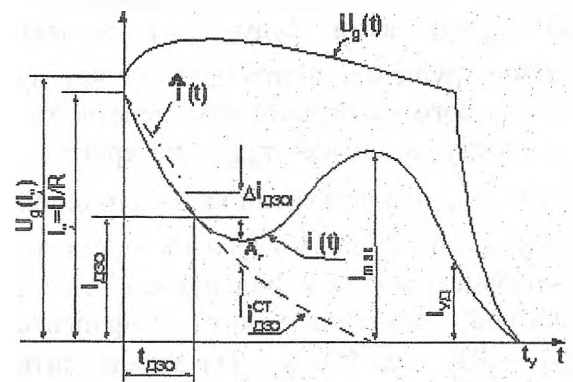


Рис. 1. Залежність моменту часу та значення струму зрушення при вимиканні з утворенням електричної дуги

На рис. 2 приведена розроблена авторами структурна схема пристрою. Тут вихід керованого джерела 1 живлення постійної напруги U через нормально-ввімкнутий контакт 2 контактора ввімкнутий послідовно обмотці 3 випробуючого реле (що має омичний опір R) і прецизійному опорі 4 (ПС4) що має величину r . Вихід на ПС4 поданий на вхід масштабного перетворювача 5 з коефіцієнтом передачі $\frac{1}{r}$. Перепад напруги на ПС4 до-

рівнює $i_p \cdot r \cdot R$ (i_p – перехідний струм при вимкненні з електричною дугою), а напруга на вході масштабного перетворювача 5 (МП5) визначається, $i_p \cdot r \cdot \frac{1}{r} = i_p$,

тобто пропорційна миттєвому значенню струму. У пристрої запам'ятовування (ЗУ6) аналогова напруга перетворюється в цифровий код за допомогою вбудованого в ЗУ6 перетворювача «аналог-код» і запам'ятовується у всьому діапазоні часу зміни струму від $t=0$ до $t=t_y$. З виходу ЗП6 сигнал надходить на вхід диференціатора

7 (ДИФ1), з виходу якого сигнал $\left(\frac{di_p}{dt}\right)_{t=0}$ діє на вхід блоку 8 обчислювача постійної часу $\tau_{дзво}$ (БВ $\tau_{дзво}$ 8),

$$\tau_{дзво} = \frac{I_y}{\left(\frac{di_p}{dt}\right)_{t=0}}$$

де $\tau_{дзво}$ обчислюється за алгоритмом.

З виходу БВ $\tau_{ДЗВО}$ 8 сигнал $\tau_{ДЗВО}$ подається на перший вхід перетворювача 9, (ФПі $_{ДЗВО}(t)$) який буде ряд значень струму зрушення відповідно до виразу (1), для чого на перший вхід перетворювача поступає сигнал $\tau_{ДЗВО}$, на другий – сигнал I_y , а на четвертий вхід – вихідний сигнал від блоку перебудови 16 коефіцієнта (параметра) $\sigma_{ДЗВО}$. Звідси ж поступає і початкове значення цього коефіцієнта $\sigma_{РЗОе}^0$ – (РЗ) вхід ФПі $_{ДЗВО}(t)$ 9 надходить сигнал з виходу формувача тимчасових інтервалів 11 (ФЧІ 11), який вмикається в роботу при синхронному розмиканні контактів 2 і 12 контактора. У першому циклі обчислюється числовий ряд величини струму зрушення відповідно до виразу (1) при нульовому наближенні коефіцієнта, $\sigma_{ДЗВО}^0$ тобто

$$i_{ДЗВО}^0(t_i) = I_y + K_{ДЗВО} \cdot I_y \cdot (1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_{ДЗВО}}}) + \frac{(\sigma_{ДЗВО}^0 \cdot K_{ДЗВО}^2 + K_{ДЗВО}) \cdot I_y \cdot t_i^2}{2 \cdot \tau_{ДЗВО}^2} \quad (4)$$

Так визначають розрахункові значення струму в період зрушення, і ці величини з виходу ФПі $_{ДЗВО}(t)$ надходять до першого підсумовуючого входу першого двовходового суматора 13, на другий вхід якого подаються величини дійсного струму для цих же моментів часу, вони поступають від ЗУБ. У суматорі 13 відбувається операція віднімання $i_{ДЗВО}^0(t_i)$ з $i_{ДЗВО}(t_i)$ і виходять нульові різниці.

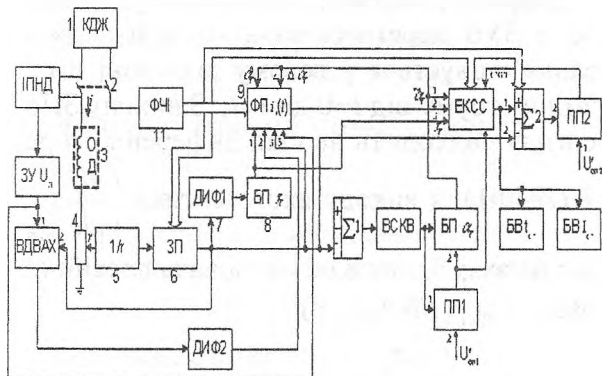


Рис. 2. Структурна схема пристрою з визначенням моменту часу та струму зрушення процесу вимикання

$$\Delta^0 \cdot i_{ДЗВОi} = i_{ДЗВО}^0(t_i) - i_{ДЗВО}(t_i) \quad (5)$$

З виходу суматора 13 різниці (5) поступають на вхід обчислювача середньоквадратичного відхилення 14 (ВСКО14), де для нульового наближення $\sigma_{РЗВО}^0$ визначається нульове наближення середньоквадратичного відхилення (СКО).

$$\sigma_{i_{ДЗВО}}^0 = \sqrt{\frac{(\Delta^0 \cdot i_{ДЗВОQ})^2 + (\Delta^0 \cdot i_{ДЗВОQ})^2 + \dots + (\Delta^0 \cdot i_{ДЗВОQ})^2}{n}} \quad (6)$$

Це нульове наближення $\sigma_{i_{ДЗВО}}^0$ подається на перший вхід першого порогового пристрою 15 (ПУ1), де порівнюється з опорним сигналом (в цифровому коді) $U_{оп}^1$. $U_{оп}^1$ відповідає заданій точності апроксимації, що визначається величиною ϵ_1 .

Якщо $(\sigma_{ДЗВО}^0 - U_{оп}^1) > \epsilon_1$, то блок 16 перебудови параметра (БП 16) виробляє приріст коефіцієнта $\Delta\sigma_{ДЗВО}$ і додає його до нульового наближення $\sigma_{ДЗВО}^0$. Тепер на четвертому вході ФПі $_{ДЗВО}(t)$ (блок 9) має місце сигнал $\sigma_{ДЗВО}^0 + \Delta\sigma_{ДЗВО}$. У вище описаному порядку за алгоритмом (4) обчислюється новий ряд значень струму

$$i_{ДЗВО}^1(t_i) = I_y + K_{ДЗВО} \cdot I_y (1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_{ДЗВО}}}) + \frac{[(\sigma_{ДЗВО}^0 + \Delta\sigma_{ДЗВО}) \cdot K_{ДЗВО}^2 + K_{ДЗВО}] \cdot I_y \cdot t_i^2}{2 \cdot \tau_{ДЗВО}^2} \quad (7)$$

а потім за алгоритмом (5) обчислюються перші різниці між значеннями розрахункового і дійсного струмів в моменти часу t_i

$$\Delta^1 \cdot i_{ДЗВОi} = i_{ДЗВО}^1(t_i) - i_{ДЗВО}(t_i) \quad (8)$$

Далі по алгоритму (6) розраховується перше наближення СКО $\sigma_{i_{ДЗВО}}^1$. Якщо, $(\sigma_{ДЗВО}^1 - U_{оп}^1) > \epsilon_1$ то операція алгебраїчного додавання (тобто $\Delta\sigma_{ДЗВО}$ може мати знак «-») і повторюється доти, доки не буде задовільнятися нерівність

$$(\sigma_{i_{ДЗВО}}^k - U_{оп}^1) \leq \epsilon_1, \quad (9)$$

де k – номер k -ї ітерації. При виконанні нерівності (9) операції перебудови (пошу-

ку) параметра $\sigma_{ДЗВО}$ припиняються і знайдене значення параметра $\sigma_{ДЗВО}$, що задовільняє точність апроксимації кривої струму, з виходу БП $\sigma_{ДЗВО}$ 16 подається на перший вхід екстраполятора кривої статичного струму 17 (ЕКСС 17) на другий вхід якого поступає сигнал $\tau_{ДЗВО}$ від БВ $\tau_{ДЗВО}$ 8, на третій вхід (ЕКСС 17) з виходу 9 надходять величини знайдених параметрів $K_{РЗВО}$ і $K_{ДЗВО}$. ЕКСС 17 запускається в роботу за сигналом з виходу ПП1, що подається на його пусковий вхід. Екстраполятор 17 здійснює обчислення значень статичного струму за наступним алгоритмом:

$$i_{ДЗВОСТ}(i) = i_y + K_{ДЗВО} \cdot I_y (1 - e^{-\frac{i}{\tau_{ДЗВО}}}) + \frac{[\sigma_{ДЗВО} \cdot K_{ДЗВО}^2 + K_{ДЗВО}] \cdot I_y \cdot t_i^2}{2 \cdot \tau_{ДЗВО}^2} \quad (10)$$

для значень t_i в межах від 0 і далі, поки різниця між значеннями розрахункового статичного струму і дійсного струму в обмотці не перевищить деякого, наперед заданого числа, ϵ_2 що визначає точність знаходження часу $t_{ДЗВО}$ і величини струму зрушення, $I_{ДЗВО}$ тобто поки не почне виконуватися умова:

$$i_{ДЗВОСТ}(t_i) - i_{ДО}(t_i) \geq \epsilon_2, \quad (11)$$

де $i_{ДО}(t_i)$ – значення дійсного струму в обмотці в моменти часу t_i (літера «Д» в індексі означає вимикання з дугою, буква «О» – відпускання реле), $i_{ДОСТ}(t_i)$ – величини розрахункового статичного струму за рівнянням (10). Час t_i при якому починає виконуватися нерівність (11) і буде часом зрушення реле при відпусканні з електричною дугою, $t_{ДЗВО}$, а величина статичного струму $i_{ДОСТ}(t_{ДЗВО})$ і буде струмом зрушення при відпусканні з електричною дугою $I_{ДЗВО}$.

Перевірка виконання умови (11) здійснюється наступним чином. З виходу ЕКСС 17 сигнал статичного струму,

$i_{ДОСТ}(t_i)$, розрахованого за алгоритмом (10), подається на перший вхід другого двухвхідного суматора 18, на другий від'ємний вхід якого подається сигнал дійсного струму $i_{ДО}(t_i)$ з виходу схеми пам'яті ЗП 6. З виходу суматора 18 різниця $i_{ДОСТ}(t_i) - i_{ДО}(t_i)$ подається на перший вхід другого порогового пристрою 19 (ПУ2) на другий вхід якого подається (в цифровому коді) опорний сигнал $U_{ОП}^2$. $U_{ОП}^2$ відповідає значенню ϵ_2 . Якщо $i_{ДОСТ}(t_i) - i_{ДО}(t_i) \geq \epsilon_2$, то на вхід другого порогового пристрою подається сигнал, що зупиняє роботу екстраполятора по стоповому входу останнього, який пов'язаний з виходом другого порогового пристрою. Після зупинки екстраполятора з його виходу знайдений час зрушення $t_{ДЗВО}$ і обчислюється в ньому величина струму зрушення $I_{ДЗВО} = i_{ДОСТ}(t_{ДЗВО})$ надходять, відповідно на входи блоку відображення часу зрушення 20 і блоку відображення величини струму зрушення 21 (способом відображення може бути або друк, або цифрова індикація і ін.). Для синхронізації роботи пристрою в цілому вихід формувача тимчасових інтервалів 9 поданий на входи ЗП 6, першого диференціатора 7, ФП $i_{ДЗВО}(t)$ 9, ЕКСС 17, суматори 13 і 18.

Паралельно контакту 2 підключені вимірник падіння напруг на електричній дузі 22 (ИПДН 22), вихід якого поданий на вхід запам'ятовуючого пристрою 23 падіння напруги на дузі (ЗУИД23), вихід якого поданий на перший вхід обчислювача динамічної вольт-амперної характеристики дуги 24 (ВДВАХ 24) і на п'ятий вхід ФП $i_{ДЗВО}(t)$ 9. З виходу ЗП 6 на другий вхід ВДВАХ поступає значення струму в обмотці збудження. Цей струм і струми в електричній дузі співпадають, так як дуга і обмотка ввімкнені послідовно. Вихід ВДВАХ 24 поданий на вхід другого диференціатора 25 (ДИФ 2), з виходу якого величина $\left(\frac{dU_p}{di}\right)_{t_i} = R_{ДЗВО}$ поступає на третій вхід ФП 9, на п'ятий вхід якого поступає вихід ЗУ U_D 23.

Операції побудови (обчислення) динамічної вольт-амперної характеристики електричної дуги здійснюється таким чином. Відрізок часу $t = [0, t_y]$ розбивається на n рівних інтервалів (рис. 1). Потім будується таблиця залежності $i_{до}(t_i)$ і $U_{до}(t_i)$ (використовується інформація, накопичена в ЗП 6 і в ЗУ U_d 23). Як випливає з рис. 1, залежність $i_{до}(t_i)$ і $U_{до}(t_i)$ нелінійні і монотонні, тобто одна і та ж величина струму або падіння напруги на електричній дузі можуть відповідати як мінімум двом моментам часу з інтервалу $t = [0, t_y]$. Для усунення цієї неоднозначності і побудови динамічної вольт-амперної характеристики $U_d = F(i_{до})$ необхідно отриманий ряд значень струму (для моментів часу t_i) перебудувати в порядку зростання, а величини напруги на дузі, відповідні цим же моментам часу, t_i відкласти по осі ординат. З'єднавши отримані точки деяким найкращим чином і апроксимувавши отриману криву аналітично, отримаємо аналітичне вираження для динамічної вольт-амперної характеристики електричної дуги. Як приклад приведемо таблицю.

Таблиця 1.

Алгоритм побудови динамічної вольт-амперної характеристики електричної дуги

| Зарєстровані значення струму в обмотці $i_{до}$ і падіння напруги на електричній дузі U_p | | | Перебудовані в порядку зростання величин струму залежності | |
|---|-------------------------|------------------------|--|------------------------|
| Час t_i | Струм (А) $i_{до}(t_i)$ | Напруга (В) $U_d(t_i)$ | Струм (А) $i_{до}(t_i)$ | Напруга (В) $U_d(t_i)$ |
| 0 | 18 | 13 | 0 | 0 |
| 1 | 10 | 17 | 3 | 7 |
| 2 | 6 | 14 | 6 | 14 |
| 3 | 8 | 11 | 8 | 11 |
| 4 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 5 | 3 | 7 | 10 | 17 |
| 6 | 0 | 0 | 18 | 13 |

Такий алгоритм побудови динамічної вольт-амперної характеристики, яка відображена в приведеному прикладі двома останніми колонками в табл. 1.

Використання ідентифікатора часу і величини струму зрушення при відпущенні реле постійного струму дозволить підвищити точність визначення цих двох найважливіших параметрів, що характеризують технічний стан реле. Оскільки реле є важливим елементом практично будь-якої технічної системи, більш висока точність і простота діагностики підвищують безпеку роботи таких систем, знижують експлуатаційні витрати і в результаті приводять до утворення істотного економічного ефекту.

Висновки

Розроблена математична модель, структурна схема пристрою та методика виявлення додаткових діагностичних параметрів магнітної підсистеми, яка дозволяє визначити динамічну індуктивність, сталу часу електромагнітного ланцюга, магнітний опір сталі для періоду вимикання, значення струмів за період зрушення та рух якоря, сформулювати ряд принципів виразів, що в сумісності з вище наведеними параметрами в повній мірі характеризують криву перехідного струму.

Список літератури

1. Агарянянц Р. А. Динамика, синтез и расчет электромагнитов. – М.: Наука, 1967. – 272 с.
2. Корн Г. Справочник по математике для инженера. – М.: Наука, 1975. – 831 с.
3. А. с. Устройство для контроля регулировочных параметров герметизированных электромагнитных реле / В. С. Каныков (СССР). – № 748.354 от 15.07.80.
4. А. с. МКИ 605 В.23/02. Устройство для измерения силы электромагнитных элементов постоянного тока / Р. А. Агарянянц (СССР). – № 783.756 от 30.11.80.