

*к.т.н Комісаренко О.І.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

МЕТОДИКА ПЕРЕВІРОЧНОГО РОЗРАХУНКУ КЕРОВАНИХ ДУГОГАСИЛЬНИХ КОНТАКТІВ

Описується методика перевірного розрахунку електромагніту і процесу дугогасіння у схемі гібридного вимикача постійного струму, дугогасильні контакти якого управляються електромагнітним приводом із струмовою котушкою. Застосування розробленої схеми і методики забезпечить менші комутаційні перенапруги й знизить енерговиділення на елементах контура.

Ключові слова: методика, схема, електромагніт, дугогасильні контакти, комутація.

Описывается методика поверочного расчета электромагнита и процесса дугогашения в схеме гибридного выключателя постоянного тока, дугогасительные контакты которого управляются электромагнитным приводом с токовой катушкой. Применение разработанной схемы и методики обеспечит меньшие коммутационные перенапряжения и снизит энерговыделение на элементах контура.

Ключевые слова: методика, схема электромагнит, дугогасительные контакты, коммутация.

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними задачами. Надійність роботи електроустаткування, особливо якщо в схемах присутні напівпровідникові прилади й індуктивні елементи, неабиякою мірою залежить від якості процесу відключення, яке забезпечують комутаційні апарати, застосовані в схемі. Для безпечної комутації апарат і його схема за період відключення повинні забезпечити мінімальне енерговиділення на елементах навантаження при допустимому рівні перенапруг.

Розроблена схема комутації, наведена на рисунку 1, дозволяє зберегти в гібридному апараті всі основні переваги контактних комутаційних апаратів. При відключенні ланцюга таким апаратом істотно знижується енергія, що виділяється в дузі й навантаженні при низькому (контрольованому) рівні комутаційних перенапруг. Але, для забезпечення закладеного принципу дії, необхідно відповідним чином погоджувати тягову характеристику електромагніту й параметри контактно - дугогасильної системи. Оскільки йдеться про динамічні процеси в електрома-

гнітному механізмі й у дузі відключення, завдання представляється доволі складним. У даній роботі наведено рішення цієї задачі в першому наближенні, зрозумілому для інженерних працівників і проектувальників. Методика показує взаємозв'язок параметрів, і буде корисною для вирішення практичних завдань при проектуванні аналогічних пристроїв.

Аналіз досліджень і публікацій. Схема розробленого вимикаючого пристрою рисунок 1 [1] містить: головні контакти 1, паралельно активно-індуктивному навантаженню 2 включений ланцюг, що містить діод 3, керовані дугогасильні контакти 4 і 5, з'єднану гнучким струмопідводом 6 з рухомим контактом 5 струмову котушку 7 стежачого електромагнітного приводу, сердечник 8 якого механічно пов'язаний з рухомим контактом 5 і зворотною пружиною 9.

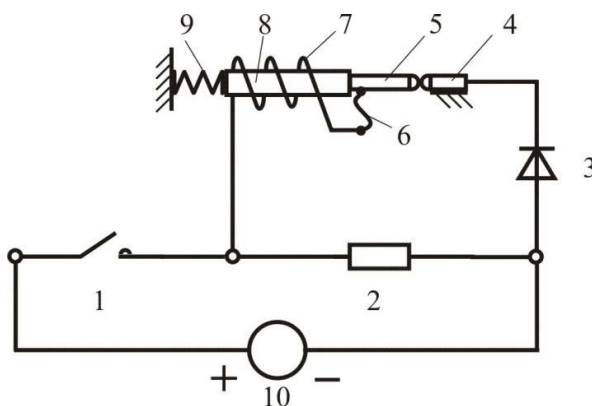


Рисунок 1 - Схема вимикаючого пристрою

Схема працює таким чином. Після розмикання контактів 1 електрична дуга, що утворилася на них, швидко гасне, оскільки під дією ЕРС самоіндукції, що виникла в навантаженні 2 включається діод 3. Електромагнітна енергія, запасена в навантаженні 2, розсіюється в контурі 2, 3, 4, 5, 6, 7, 2. Струм, що з'явився в контурі, обтікає котушку 7, яка втягує сердечник 8 і контакти 4 і 5 розмикаються. На дузі, що утворилася між ними, відбувається розсіювання енергії, запасеної в навантаженні. При цьому енергія відводиться від інших елементів контура на дугу.

Із зменшенням струму опір дуги на контактах 4 і 5 збільшується відповідно до співвідношення [2]:

$$r_{\delta} = \frac{e_{\delta}(i) \cdot l_{\delta}}{i}, \quad (I_0 \geq i \geq 0), \quad (1)$$

де $e_{\delta}(i)$ й i - градієнт напруги та струм дуги;
 l_{δ} - довжина дуги.

При неконтрольованому процесі гасіння дуги це може привести до надмірного зростання швидкості спаду струму в контурі і виникненню небезпечних перенапруг:

$$U_{\delta,max} = E_{\delta,ж} + L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

де $U_{\delta,max}$ - максимальна за період відключення напруга на дузі;

$E_{\delta,ж}$ - ЕРС джерела живлення;

L - індуктивність контура,

що, в свою чергу, може викликати повторні запалювання дуги на контактах або вивести з ладу напівпровідникові прилади.

Постановка задачі. Завданням розрахунку є визначення параметрів стежачого електромагніту, контактів, дуги відключення й їх узгодження з метою забезпечення заданого процесу відключення. В ідеалі процес відключення повинен відповідати оптимальному процесу [3]:

$$u_d(t) = R_d \cdot i = U_e + e_d(i) \cdot I_d(i) = U_{\delta}^{max}, \quad (3)$$

де U_e - приелектродне падіння напруги;

U_{δ}^{max} - максимально допустима напруга на дугогасильних контактах.

У першому наближенні нехтується інерцією рухомих частин та електромагнітних процесів, вважається також, що дуга розташовується співвісно контактам і має квазіпружні властивості.

Виклад матеріалу та його результати. На першому етапі проектування вибирається тип магнітопровода та загальна компоновка конструкції. Наприклад, вибирається електромагніт соленоїдного типу і прямоходова конструкція контактів (рис.2). Початковими даними розрахунку є:

максимальний струм, що відключається. I_{0max} (вважається, що в момент включення діоду 3 (рис.1) струм в дугогасильних контактах приблизно рівняється струмові навантаження I_H);

допустимий рівень комутаційних перенапруг:

$$K_{II} = \frac{U_{\delta}^{max}}{E_{\delta,ж}} \quad (4)$$

(визначається можливостями ізоляції навантаження і апарата та запасом по напрузі напівпровідникових приладів);

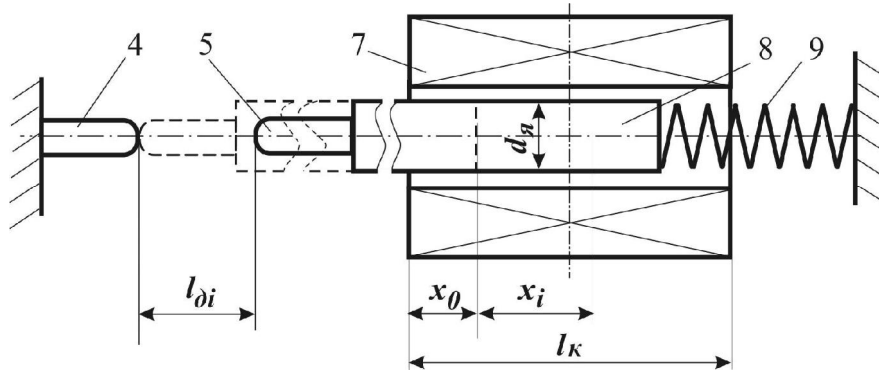


Рисунок 2 - Загальна компоновка конструкції дугогасильних контактів та стежачого електромагніта

діаметр якоря $d_{я}$ електромагніту (істотно впливає на величину сили електромагніту і зсув її максимуму [4]);

початкове положення x_0 якоря 8 (початкове занурення - визначається, зокрема, початковим контактним натисненням),

жорсткість зворотної пружини $c_{з.н}$ та її довжина $l_{пр}$ (визначаються вимогами динаміки механізму та ін.).

Розрахунок починається з визначення максимального ходу якоря x_{max} . Для цього знаходиться максимальна довжина дуги $l_{д.мах}$. Враховуючи прийняті допущення, з рівняння (3) маємо:

$$l_{д.мах} = kx_{max} = k \frac{U_{д}^{max} - U_e}{e_{д}(I_{0max})}, \quad (5)$$

де k - коефіцієнт, що враховує співвідношення плечей важелів при поворотній конструкції механізму (для прямоходової системи $k=1$);

x_{max} - максимальний хід якоря;

$e_{д}(I_{0max})$ - градієнт напруги дуги при струмі I_{0max} , (визначається аналітично або знаходиться за експериментальними даними відповідно до конструкції дугогасильного пристрою [2]).

Початкове натиснення дугогасильних контактів $F_{д.к.н}$ визначається з умов відсутності їх зварювання. Для цього можна використати одну з відомих залежностей, наприклад, просту [5]:

$$I_{н.зв} = k_{зв} \sqrt{F_{д.к.н}}, \quad (6)$$

де $k_{зв}$ - коефіцієнт зварювання;

$I_{н.зв}$ - початковий струм зварювання (приблизно приймається $I_{н.зв} = I_{0max}$);

Звідки

$$F_{\text{д.к.п.}} = \left(\frac{I_{\text{н.зб}}}{k_{\text{зб}}} \right)^2 = \left(\frac{I_{\text{д.мак}}}{k_{\text{зб}}} \right)^2. \quad (7)$$

Таким чином знаходиться мінімальна сила в протидіючій характеристиці $F_{\text{пр}}(x)$. Далі визначається протидіюча характеристика $F_{\text{пр}}(x)$ (рис.3):

$$F_{\text{пр}}(x) = F_{\text{д.к.п.}} + c_{\text{з.п}} (x - x_0). \quad (8)$$

Чим більше початкове занурення x_0 , тим меншого струму потрібно для утримання якоря в кінці процесу відключення (точка 3, рис.3). З іншого боку, чим більше x_0 , тим менше максимальний хід якоря, а, тому і максимальна довжина дуги і напруга на ній (при прямоходової системі механізму рис.2).

Наступним етапом ставиться задача визначити намагнічувальну силу електромагніту, що забезпечує переміщення якоря 8 і пов'язаного з ним дугогасильного контакту 5 (рис.1 і 2) в точку $x_{\text{мак}} = l_{\text{д.мак}}$, (рис.3). Сила, що діє на якір втяжного електромагніту без магнітопровода, в загальному вигляді визначається рівнянням:

$$F_e = 1,02 \cdot 10^{-7} \theta \cdot S_y (B_y - \mu_0 \theta), \quad (9)$$

де B_y – індукція в перетині, відповідному початку обмотки;

S_y – площа поперечного перетину якоря;

$\theta = wi$ – намагнічувальна сила котушки;

w - число витків котушки;

μ_0 - магнітна постійна.

Проте, для спрощення в першому наближенні, враховуючи насичений стан якоря, що звичайно має місце, залежність електромагнітної сили, що діє на якір, у функції його положення може бути представлена у вигляді [4]:

$$F_e = F_{e,\text{мак}} \cdot f(x)$$

або

$$\left. \begin{aligned} F_e &= 2,5F_{e.\max} \cdot \frac{x}{l_k}, & (0 \leq x \leq 0,4l_k); \\ F_e &= F_{e.\max}, & (0,4l_k < x \leq 0,84l_k); \\ F_e &= 2,27F_{e.\max} \cdot (1 - 0,67 \frac{x}{l_k}); & (0,84l_k < x \leq 1,5l_k). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Тут

$$F_{e.\max} = c \cdot S_{\text{я}} \frac{\theta}{l_k}, \quad (11)$$

де $c = 1,57 \div 1,76 \text{ Н/м} \cdot \text{А}$;

l_k – довжина котушки, м (приймається, наприклад, $l_k = l_{\text{д.мак}}$);

Сімейство тягових характеристик, побудованих по (10-11) для різних θ представлено на рисунку 3. Підстановкою у (8) значення максимального ходу якоря:

$$x = x_{\max} = l_{\text{д.мак}}, \quad (12)$$

знаходиться максимальна протидіюча сила $F_{\text{пр.мак}}$, яку розвиває пружина 9 при переміщенні якоря 7 на максимальну відстань (точка 1, рис.3). Підстановкою у (10) $F_e = F_{\text{пр.мак}} = F_{e1}$, з урахуванням (12), отримується значення потрібної намагнічувальної сили котушки :

$$\Theta_{\max} = w I_{0\max} = \frac{F_{\text{пр.мак}} \cdot l_k}{c \cdot S_{\text{я}} \cdot f(x_{\max})}, \quad (13)$$

звідки знаходиться потрібна кількість витків котушки:

$$w = \frac{F_{\text{пр.мак}} \cdot l_k}{c \cdot S_{\text{я}} \cdot f(x_{\max}) \cdot I_{0\max}}. \quad (14)$$

Тепер можна знайти силу тяги електромагніту F_{ei} для кожного поточного значення i_i струму, що відключається (точка 2, рис. 3). Поточний струм визначається з рівняння:

$$L \frac{di}{dt} + iR + u_{\delta} = E_{\text{джер}}, \quad (15)$$

де R - активний опір навантаження.

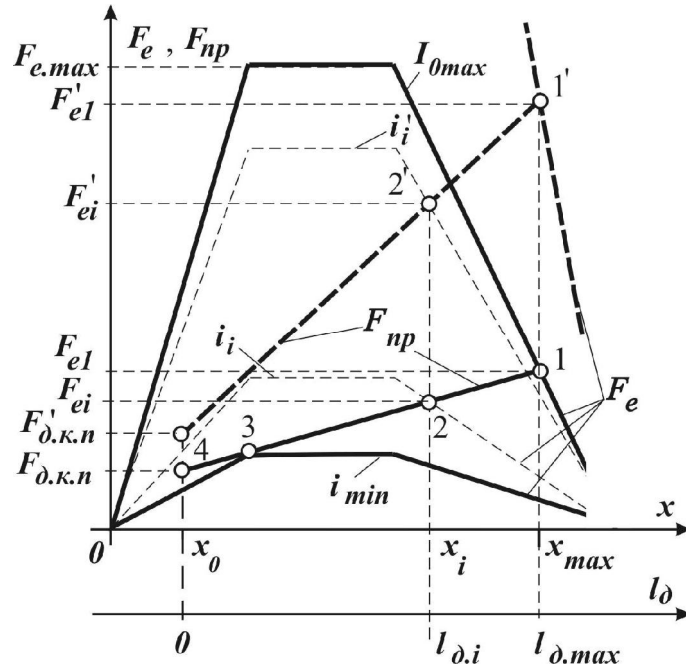


Рисунок 3 – Електромеханічні та протидіючі характеристики стежачого електромагніту

Спільне рішення рівнянь (8-15) дозволяє визначити форму кривої напруги на дугогасильних контактах і, якщо вона не відповідає бажаній, вносяться корективи в початкові дані. Враховуючи нелінійний характер рівнянь, рішення даної задачі може бути одержано чисельними методами. На рисунку 3 представлена графічна інтерпретація такого рішення. Починаючи з точки 1, яка відповідає струму I_{0max} , зменшується поточний струм на величину Δi та обчислюються нові значення сили тяги F_{ei} , положення якоря x_i та нова довжина дуги $l_{\delta i}$ (рис.3). З (3) знаходиться значення $u_{\delta i}$, а рівняння (15) дає значення часу. Отримана крива $u_{\delta}(t)$ порівнюється з оптимальною, і приймається рішення про необхідність корегування параметрів конструкції, наприклад, жорсткості пружини $9 c_{3,n}$. (слід зауважити, що при незмінній силі $F_{d.k.n}$, (точка 4 на рис. 3) необхідно змінити і довжину пружини). На рисунку 3 наведено варіант зміни в сторону збільшення $c_{3,n}$ (пряма F'_{np}). Відповідно аналогічні точки для нового розрахунку на рисунку 3 позначені штрихом.

При зниженні струму в контурі до величини i_{min} (точка 3) досягається точка нестійкої рівноваги і, при подальшому зниженні струму, під

дією пружини, контакти 4, 5 змикаються. Після чого процес відключення описується рівнянням:

$$L \frac{di}{dt} + iR_{\pi} = 0, \quad (0 \leq i < i_{min}), \quad (16)$$

з якого можна знайти вираз для струму:

$$i = i_{min} \exp(-t/T), \quad (17)$$

де $T = L/R$ - постійна часу вимикаємого контура.

Напруга на контактах при цьому дорівнює нулю. Слід зазначити, що чим більше значення струму i_{min} , тим довше протікає процес відключення і тим більше енергії виділяється на активному опорі навантаження. На величину i_{min} впливають початкове контактне натиснення, параметри пружини 9 та конфігурація електромагнітного поля в зоні початкового занурення якоря x_0 .

Висновки й напрямок подальших досліджень. Викладена методика дає уявлення про алгоритм проектування комутуючих пристроїв з взаємозв'язаними електромеханічними і дугогасильними процесами. З урахуванням теорії оптимального процесу відключення [3] її можна буде покласти в основу системи автоматизованого проектування аналогічних пристроїв. Надалі потрібна її апробація та уточнення з урахуванням нелінійних характеристик елементів схеми і інерційності процесів.

Бібліографічний список

1. Комісаренко О.І. *Вимикаючий пристрій постійного струму Патент на корисну модель 41252 Бюл. № 9 от 12.05 2009 р.*
2. Таев И. С. *Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М.: Энергия, 1973. – 424 с.*
3. *Исследование оптимальных условий функционирования гибридных аппаратов с отделением источника питания / С. Л. Ламанов, А. И. Комисаренко, В. И. Мельничук, В. К. Богданов // Сборник научных трудов/ ДонГТУ. – Алчевск, 2006. – Вып. 21. – С. 166 – 175.*
4. Гордон А.В., Сливинская А.Г. *Электромагниты постоянного тока. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. - 447 с.*
5. Сахаров П.В. *Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия, 1971. - 560 с.*

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Зеленовим А.Б.