

*к.т.н., провід. наук. співробітн. Комісаренко О.І.,
к.т.н., директор НДПКІ «Параметр» Михайлова Л.Ф.,
м.н.с. Кушнір О.В.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)
к.т.н. Жученко Н. О.
(СНУ ім. Даля, м. Луганськ, Україна)*

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ДУГОВОГО КОМУТАТОРА ГІБРИДНОГО АПАРАТУ

В ході чисельних і натурних експериментів встановлені співвідношення коефіцієнтів моделі дугового комутатора і параметрів різних схем гібридних апаратів з різним навантаженням. Використання розробленої моделі сприятиме більшій ефективності і зменшить витрати при дослідженнях та інженерному проектуванні гібридних апаратів постійного струму. Найбільший ефект може бути досягнутий при дослідженнях та проектуванні комутаційних і захисних апаратів для перетворювальної техніки.

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними задачами. Широке розповсюдження і постійне вдосконалення силових напівпровідникових приладів, не виключає потребу в апаратах, в яких при відключенні навантаження виникає електрична дуга. Навпаки, часто тільки такі апарати (наприклад, автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники, імпульсні дугові комутатори) здатні ефективно захищати напівпровідникові прилади при виникненні аварійних режимів роботи. Такі апарати мають ряд цінних переваг: велика перевантажувальна здатність, простота устрою, мала вартість, велика глибина комутації, гальванічна розв'язка комутуваних ланцюгів, компактність та ін.. Їх недоліки, в основному, пов'язані з термічною дією електричної дуги і слабкою її керованістю. Для усунення або зменшення багатьох недоліків апаратів з дугою відключення розроблені пристрої, в яких поєднуються позитивні якості дугових комутаторів і напівпровідникових приладів - гібридні апарати [1].

При модернізації або розробці нових гібридних апаратів специфіка їх комутуючого вузла вимагає проведення великого числа натурних експериментів. Значні випробувальні струми і напруги потребують істотних витрат і необхідність встановлювати силове електроустаткування на великі потужності. В той же час, багато параметрів і закономірнос-

тей електромагнітних процесів при відключенні силових активно-індуктивних ланцюгів можна визначити шляхом комп'ютерного моделювання. Тому задача розробки адекватних моделей гібридних електричних апаратів з дуговим комутатором є актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Моделювання напівпровідникової частини схеми гібридного апарату не представляє труднощі. Відомо немало комп'ютерних програм і прикладів досить точного моделювання процесів в силових електронних схемах. Це пов'язано з поширеністю таких задач в техніці, детермінованістю процесів, наявністю добре розробленого математичного апарату. В той же час, інша частина схеми і конструкції гібридного апарату - дуговий комутатор - важко піддається моделюванню. Це пов'язано зі складними електричними, термічними та газодинамічними процесами які відбуваються в дузі, і які мають у великій мірі стохастичний характер.

Існують методи математичного моделювання електричної дуги відключення, які використовуються, в основному, при дослідженнях звичайних контактних комутаційних апаратів змінного струму [2].

Наприклад, на основі рівняння, що описує динамічний стан дуги

$$\frac{dQ}{dt} = E \cdot i_{\delta} - P_0 \quad , \quad (1)$$

визначивши взаємозв'язок між опором дуги $r_{\delta} = u_{\delta} / i_{\delta}$ та її тепловмістом Q

$$r_{\delta} = R_0 \cdot e^{\frac{Q}{Q_0}} \quad (2)$$

знаходиться вираз динамічної вольт-амперної характеристики дуги:

$$\frac{d}{dt} \ln \frac{i_{\delta}}{E} = \frac{E \cdot i_{\delta} - P_0}{Q_0} \quad (3)$$

або для повної довжини дуги l_{δ} , з урахуванням того що напруга на всій дузі $u_{\delta} = l_{\delta} \cdot E$ маємо

$$\frac{d}{dt} \ln \frac{i_{\delta} \cdot l_{\delta}}{u_{\delta}} = \frac{u_{\delta} \cdot i_{\delta} - P_0 \cdot l_{\delta}}{Q_0 \cdot l_{\delta}} \quad , \quad (4)$$

де Q - кількість тепла, що міститься в одиниці довжини дуги;

E, i_{δ} - градієнт напруги і струм дуги;

P_0 - потужність, що відводиться від одиниці довжини дуги;

t - час;

R_0 - постійна величина;

Q_0 - кількість тепла, при внесенні якого в стовп дуги, опір дуги зміниться в $e = 2,7$ рази.

Для випадку дуги в щільній камері Г. А. Кукековим був одержаний вираз:

$$\frac{d}{dt} \ln \frac{i_d}{E} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{E \cdot i_d}{P_0} - 1 \right], \quad (5)$$

де τ - теплова постійна часу дуги, яка може бути визначена як $\tau = Q_0/P_0$ [2].

Постановка задачі. Рівняння (3) або так зване рівняння Майра одержане при багатьох допущеннях: дуга представляється у вигляді циліндра постійного діаметру; враховується тільки термічна іонізація газу; коефіцієнт теплопровідності газу вважається постійним та інші. Та все ж воно застосовується для практичного використання. Причому, точність, з якою воно відображає реальні процеси, залежить від точності, з якою для конкретних умов визначені коефіцієнти Q_0 , P_0 , R_0 , та довжина дуги l_d . Використовуючи (5) потрібні дані про τ , P_0 , R_0 . Застосовуються найчастіше ці моделі для досліджень звичайних контактних комутаційних апаратів змінного струму. Тому було поставлене завдання розробити на базі рівняння Майра математичну (комп'ютерну) модель гібридного відключаючого апарату постійного струму з дуговим комутатором та дослідити її.

Виклад матеріалу і його результати. Дослідження проводилися з використанням пакету програм *MATLAB/Simulink*. Моделювались процеси вимикання навантаження гібридними комутаційними апаратами, в яких конструкція дугогасного пристрою дозволяє розбивати дугу на декілька частин і за рахунок цього відокремлювати навантаження від джерела живлення. У *Simulink* була складена схема, що моделює елементи і схему гібридного апарата і процес відключення ним активно-індуктивного ланцюга постійного струму. Схема представлена на рис.1. Вона містить джерело живлення постійної напруги U_d , дуговий комутатор $S1$, включений послідовно з навантаженням RL , паралельно навантаженню включені діод VD і другий дуговий комутатор $S2$. Решта елементів моделі служить для визначення параметрів процесу відключення.

Працює модель таким чином. Спочатку, з моменту t_1 , використовуючи математичну модель дуги (5) з параметрами τ_1 , P_{01} , R_{01} , моделюється розмикання контакту $S1$. Коли напруга на $S1$ становиться більше U_d , за рахунок ЕРС самоіндукції навантаження виконуються умови вмикання діода VD і струм навантаження перетікає з контуру, що містить контакти $S1$ і джерело живлення U_d в шунтуючий контур: RL , VD ,

замкнуті контакти $S2$. При цьому відбувається відділення джерела живлення від навантаження, що істотно знижує виділення енергії в контурі, що відключається [4]. Через проміжок часу, визначуваний особливостями конструкції дугогасного пристрою гібридного апарату, починаючи з моменту t_2 моделюється розмикання контакту $S2$, при цьому використовується математична модель дуги (5) з параметрами τ_2 , P_{02} , R_{02} .

Дослідження схеми рис.1 проводились шляхом підбору коефіцієнтів τ , P_0 , R_0 і порівняння осцилограм отриманих на моделі з осцилограмами, отриманими при експериментальних дослідженнях реальних гібридних апаратів. Експериментальні дослідження на натурних зразках проводились при напрузі джерела живлення U_d від 110 до 500В, струмах навантаження I_n від 20 до 300А та при різних постійних часу навантаження $T_n=L_n/R_n$. Досліджувались різні схеми гібридних апаратів постійного струму.

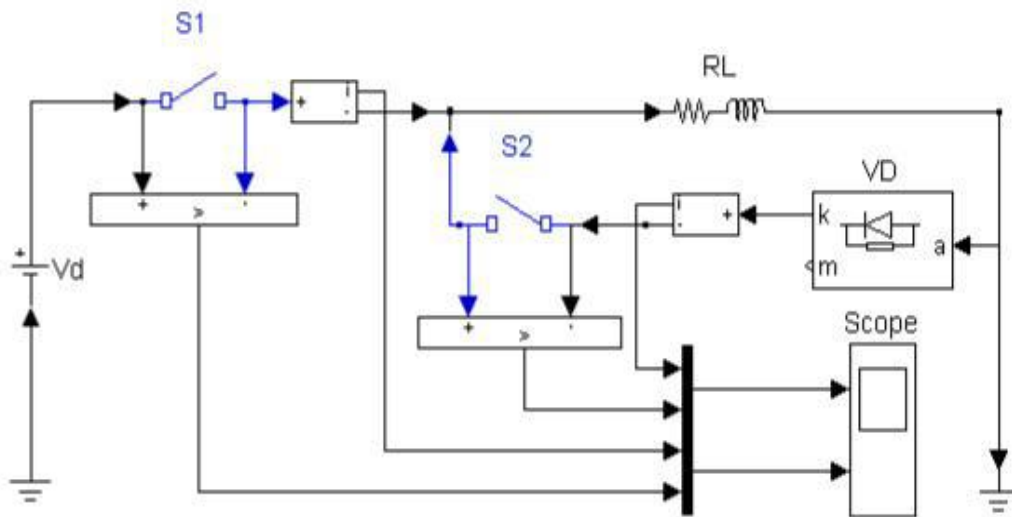


Рисунок 1 – Схема моделі відключення активно-індуктивного навантаження гібридним апаратом з дуговими комутаторами $S1$ та $S2$

На рис.2 зліва приведена осцилограма процесу відключення в схемі рис.1 при значеннях напруги джерела живлення, струму та постійної часу навантаження відповідних реальній осцилограмі, яка зображена на рис.2 справа.

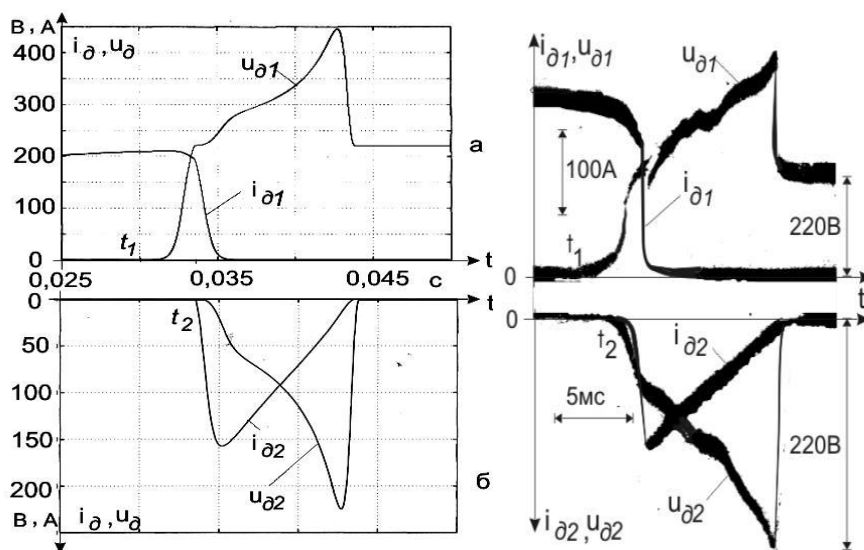


Рисунок 2 - Осцилограми моделі процесу відключення в схемі рис.1 (зліва) та реального процесу відключення навантаження гібридним апаратом рис.3 (справа) при $U_d=220B$, $I_n=200A$; $T_n=0,009c$

Реальна осцилограма знята при випробуваннях гібридного апарата, схема якого приведена на рис. 3 [3].

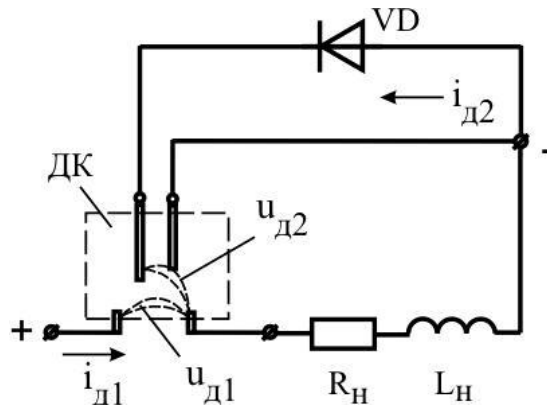


Рисунок 3 - Схема гібридного апарата постійного струму

Схема працює наступним чином. При розмиканні головних контактів електрична дуга, що утворилася на них (з напругою $u_{\theta 1}$ позначеною на рис.3) рухається під дією електродинамічних сил у напрямку до металевих пластин які розташовані в дуговому комутаторі ДК і в момент торкання лівої пластини дуга поділяється на дві частини. Частина дуги, що горить між лівим контактом (під'єднаним до "плюсу" джерела живлення) і металевою пластинною, швидко гасне як тільки значення величини напруги на ній перевищить значення напруги джерела живлення. Це відбувається з тієї причини, що в даний момент за рахунок

ЕРС самоіндукції навантаження відкривається діод VD і дуга опиняється у безіндуктивному контурі: «плюс» джерела, лівий головний контакт, металева пластина, діод VD , «мінус» джерела. При цьому відбувається відокремлення джерела живлення від вимикаючого пристрою і навантаження R_n, L_n , що значно знижує енерговиділення в контурі що відключається.

Запасена в електромагнітному полі навантаження енергія починає розсіюватися на активних опорах дуги з напругою u_{d2} і навантаження R_n в контурі, що утворився: металева пластина, діод VD , навантаження R_n, L_n , правий головний контакт. Запас електромагнітної енергії навантаження розсіюється на його активному опорі і частині дуги з напругою u_{d2} , що залишилася, в контурі. При цьому зменшується час комутації, оскільки суттєво зменшується постійна часу розсіюючого контуру:

$$T_k = L_n / (R_n + r_d), \quad (6)$$

Позначення на осцилограмах співпадають з позначеннями на схемі. Порівняння осцилограм приведених на рис.2 показує, що зважаючи на специфічність дугових процесів вони доволі співпадають. Розрахунки енергетичних показників процесів відключення в тому і другому випадках підтверджують адекватність моделі - розбіг не перевищує 10%.

На рис.4 для демонстрації можливостей моделі показані осцилограми процесу відключення навантаження гібридним апаратом постійного струму з ємнісною системою комутації та іншими параметрами навантаження. Зліва осцилограма, отримана на комп'ютерній моделі, справа - на натурному зразку. Порівняння енергетичних характеристик, розрахованих по осцилограмам, показує їх відмінність не більше 15%.

Висновки й напрямок подальших досліджень. Проведені дослідження підтвердили адекватність розробленої моделі дугового комутатора реальним процесам. В ході чисельних і натурних експериментів встановлені співвідношення коефіцієнтів моделі дугового комутатора і параметрів різних схем гібридних апаратів з різним навантаженням. Використання розробленої моделі сприятиме більшій ефективності і зменшить витрати при дослідженнях та інженерному проектуванні гібридних апаратів постійного струму. Найбільший ефект може бути досягнутий при дослідженнях та проектуванні комутаційних і захисних апаратів для перетворювальної техніки.

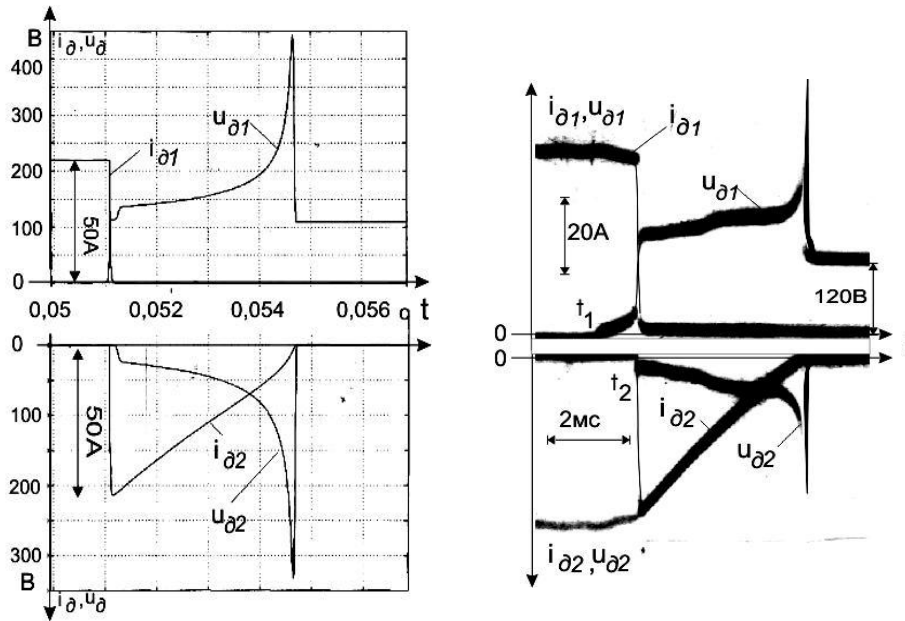


Рисунок 4 - Осцилограмми моделі процесу відключення (зліва) та реального процесу відключення навантаження гібридним апаратом з ємнісною системою комутації (справа) при $U_d=110\text{В}$, $I_H=50\text{А}$; $T_H=0,005\text{с}$

В ходе численных и натурных экспериментов установлены соотношения коэффициентов модели дугового коммутатора и параметров разных схем гибридных аппаратов с разной нагрузкой. Использование разработанной модели будет способствовать большей эффективности и уменьшит расходы при исследованиях и инженерном проектировании гибридных аппаратов постоянного тока. Наибольший эффект может быть достигнут при исследованиях и проектировании коммутационных и защитных аппаратов для преобразовательной техники.

During the numeral and models experiments correlations of coefficients of model of arc switchboard and parameters of different charts of hybrid vehicles are set with the different loading. The use of the developed model will be instrumental in greater efficiency and will decrease expenses at researches and engineering design of hybrid vehicles of direct current. Most effect can be attained at researches planning of interconnect and protective vehicles for an inverter technique.

Бібліографічний список

1. Могилевский Гибридные электрические аппараты низкого напряжения.- М.: Энергоатомиздат, 1986.-232 с.

2. Таев И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М.: Энергия, 1973. – 424 с.

3. Комісаренко О. І. Експериментальні дослідження схеми безпечної комутації індуктивного навантаження //Праці ЛВ МАІ. - 2008. -№ 2 (17) с.154-158.

4. Комиссаренко А. И. О роли источника питания в энергетическом балансе отключаемой цепи постоянного тока / А. И Комиссаренко, С. Л. Ламанов, Ю. С. Ткаченко// Вісник Східноукраїнського національного університету. -2003. – № 4 (62). – С. 110-114.

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