

В.В. ЛИТВИНЕНКО, О.Г. СЕРЕДА, І.С. ВАРШАМОВА, О.Г. КОРОЛЬ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФЕРОМАГНІТНОГО ОСЕРДЯ НА ШВИДКОДІННО ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО РОЗЧІПЛЮВАЧА З ЯКОРЕМ ПОРОТНОГО ТИПУ

Автоматичні вимикачі струмового захисту напівпровідникових перетворювачів обмежують тривалість та амплітуду надструму на такому рівні, щоб його теплова дія не перевищила максимально допустимий тепловий захисний показник напівпровідникового приладу, що захищається. Обмеження теплової дії струму короткого замикання досягнуто зменшенням власного часу спрацьовування автоматичного вимикача. Конструкція вимикача змінена таким чином, що замість базового електромагнітного розчіплювача використаний індукційно-динамічний, який, в свою чергу, складається з індуктора з феромагнітним осердям і якоря поворотного типу у вигляді мідного диску. Електродинамічне зусилля, що розвиває індукційно-динамічний розчіплювач для швидкого спрацьовування, визначається коефіцієнтом взаємної індуктивності котушки індуктора і якоря. Застосування феромагнітного осердя спричинило збільшення коефіцієнта взаємної індуктивності котушки та якоря, а отже збільшення електродинамічного зусилля, що розвиває розчіплювач, і зменшення власного часу спрацьовування вимикача. На макетному зразку проведено експериментальне дослідження власного часу спрацьовування розчіплювача за різних значень електричних параметрів конденсаторної батареї живлення індуктора, обмоткових даних котушки індуктора та габаритних розмірів диску. Результати досліджень довели як зменшення часу спрацьовування автоматичного вимикача при збереженні енергії конденсаторної батареї живлення індуктора, так і зменшення потрібної енергії конденсаторної батареї живлення індуктора при збереженні мінімального часу спрацьовування вимикача. Зменшення енергії конденсаторної батареї живлення індуктора дозволило зменшити ємність та напругу конденсаторної батареї живлення розчіплювача, а отже її габарити.

Ключові слова: автоматичний вимикач, індукційно-динамічний розчіплювач, інтеграл Джоуля, напівпровідниковий перетворювач.

В.В. ЛИТВИНЕНКО, А.Г. СЕРЕДА, И.С. ВАРШАМОВА, Е.Г. КОРОЛЬ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЕРОМАГНИТНОЙ СЕРДЕЧНИКА НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЦЕПИТЕЛЯ С ЯКОРЕМ ПОРОТНОГО ТИПА

Автоматические выключатели токовой защиты полупроводниковых преобразователей ограничивают длительность и амплитуду сверхтока на таком уровне, чтобы его тепловое действие не превысило максимально допустимый тепловой защитный показатель защищаемого полупроводникового прибора. Ограничение теплового действия тока короткого замыкания достигнуто уменьшением времени срабатывания автоматического выключателя. Конструкция выключателя изменена таким образом, что вместо базового электромагнитного расцепителя использован индукционно-динамический, который, в свою очередь, состоит из индуктора с ферромагнитным сердечником и якоря поворотного типа в виде медного диска. Электродинамическое усилие, развиваемое индукционно-динамическим расцепителем для быстрого срабатывания, определяется коэффициентом взаимной индуктивности катушки индуктора и якоря. Применение ферромагнитного сердечника повлекло за собой увеличение коэффициента взаимной индуктивности катушки и якоря, следовательно, увеличение электродинамического усилия, развиваемого расцепителем, и уменьшение собственного времени срабатывания выключателя. На макетном образце проведено экспериментальное исследование собственного времени срабатывания расцепителя при различных значениях электрических параметров конденсаторной батареи питания индуктора, обмоточных данных катушки индуктора и габаритных размеров диска. Результаты исследований доказали как уменьшение времени срабатывания автоматического выключателя при сохранении энергии конденсаторной батареи индуктора, так и уменьшение необходимой энергии конденсаторной батареи питания индуктора при сохранении минимального времени срабатывания выключателя. Уменьшение энергии конденсаторной батареи индуктора позволило уменьшить емкость и напряжение конденсаторной батареи питания расцепителя, а, следовательно, ее габариты.

Ключевые слова: автоматический выключатель, индукционно-динамический расцепитель, интеграл Джоуля, полупроводниковый преобразователь.

V.V. LYTVYENKO, O.H. SEREDA, I.S. VARSHAMOVA, O.H. KOROL'

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF A FERROMAGNETIC CORE ON THE SPEED OF AN INDUCTION-DYNAMIC RELEASE WITH TURNING ANCHOR TYPE

Circuit breakers for overcurrent protection of semiconductor converters limit the duration and amplitude of the overcurrent at such a level that its thermal effect does not exceed the maximum allowable thermal protection index of the protected semiconductor device. The limitation of the thermal action of the short-circuit current is achieved by reducing the operation time of the circuit breaker. The design of the circuit breaker is changed in such a way that instead of the basic electromagnetic release is used an induction-dynamic release, which consists of an inductor with a ferromagnetic core and a rotary armature in the form of a copper disk. The electrodynamic force producing by the induction-dynamic release for quick operation is determined by the coefficient of mutual inductance of the inductor coil and the armature. Using of a ferromagnetic core entailed an increase in the coefficient of mutual inductance of the coil and armature, therefore, an increase in the electrodynamic force producing by the release, and a decrease in own tripping time of the circuit breaker. On a prototype, an experimental study of the proper operation time of the release was carried out at various values of the electrical parameters of the capacitor bank of the inductor power supply, the winding parameters of the inductor coil and the disk dimensions. The research results have proved both a decrease in the tripping time of the circuit breaker while conserving the energy of the capacitor bank of the inductor, and a decrease in the required energy of the capacitor bank to power the inductor while maintaining the minimum tripping time of the circuit breaker. Reducing the energy of the capacitor bank of the inductor made it possible to reduce the capacity and voltage of the capacitor bank of the supply of the release, and, consequently, its dimensions.

Keywords: circuit breaker, induction-dynamic release, Joule integral, semiconductor converter.

Вступ. Напівпровідникові пристрої, зокрема тиристорні перетворювачі, що є невід'ємною складовою електротехнічних комплексів та систем, надзвичайно

чутливі до теплової дії надструмів при перевантаженнях та коротких замиканнях, а також короточасних кидках струму. Мала теплоємність напівпровідникового приладу не дозволяє тривалого перевантаження і

© В.В. Литвиненко, О.Г. Середя, І.С. Варшамова, О.Г. Король, 2021

може спричинити неприпустиме перегрівання й вихід приладу з ладу. Аналіз аварійних перехідних процесів свідчить про те, що проблема вдосконалення пристроїв та апаратів струмового захисту наразі залишається надзвичайно актуальною. Захисні пристрої, зокрема автоматичні вимикачі, повинні обмежувати тривалість та амплітуду аварійного струму на рівні, щоб його тепловий еквівалент не перевищував максимально допустимий для напівпровідникового приладу. Обмеження амплітуди аварійного струму знижує теплову дію струму на обладнання, що захищається. Час відключення аварійного струму автоматичним вимикачем складається з часу спрацьовування розчіплювача, часу відключення механізму вільного розчеплення та часу горіння електричної дуги в міжконтактному проміжку. Зазвичай це 20-40 мс залежно від величини струму короткого замикання. За такий значний час надструм досягає свого амплітудного значення та спричиняє вихід з ладу непошкоджених вентилів напівпровідникових перетворювачів. Отже встановлення автоматичних вимикачів на вході напівпровідникових перетворювачів через великі власні часи спрацьовування не дозволяє їх захистити без додаткових заходів. Обмеження теплової дії надструму досягається зменшенням власного часу спрацьовування розчіплювача автоматичного вимикача, а також зменшенням амплітуди струму короткого замикання шляхом встановлення на стороні живлення перетворювача мережевих реакторів. В реальних умовах тепловий захист тиристорних перетворювачів при внутрішніх коротких замиканнях випрямляча досягається спільною установкою на його вході мережевих реакторів в комплексі з автоматичним вимикачем.

Мета роботи – експериментальне дослідження впливу наявності феромагнітного осердя на власний час спрацьовування індукційно-динамічного розчіплювача з якорем поротного типу у вигляді мідного диску.

Постановка задач експериментального дослідження. В зоні відсікання часоелектричної характеристики в автоматичних вимикачах зменшити час спрацьовування розчіплювача миттєвої дії, яким звичайно є електромагніт, можна шляхом заміни електромагнітного розчіплювача на індукційно-динамічний [1]. Експериментально доведено, що індукційно-динамічні механізми (Thomson drive) можуть застосовуватися в якості швидкодіючих приводів електромеханічних апаратів захисту [2] й суттєво зменшити час спрацьовування автоматичного вимикача. Конструктивно індукційно-динамічний розчіплювач (ІДР) складається з індуктора у вигляді котушки зі струмом, якоря у вигляді мідного диску та блоку керування конденсаторною батареєю живлення індуктора. Величина електродинамічного зусилля, що забезпечує ІДР для швидкого розмикання контактів вимикача, залежить від величини струму в котушці індуктора при розряді на неї конденсатора живлення, а також визначається коефіцієнтом взаємної індуктивності котушки індуктора і якоря. Для ІДР з якорем поворотного типу рівняння електродинамічного моменту [3]:

$$M_{\text{мех}}(\alpha(t), t) = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha} \cdot r_0, \quad (1)$$

де i_1, i_2 – струми в котушці та якоря відповідно; $\frac{dM}{d\alpha}$ – зміна взаємної індуктивності системи в функції кута повороту рухомої частини ІДР;

Одним з напрямів збільшення коефіцієнта взаємної індуктивності котушки індуктора і якоря задля збільшення сили відкидання диска є введення у конструкцію ІДР феромагнітного осердя. Якісний аналіз впливу феромагнітного осердя на величину електродинамічного зусилля, що розвиває ІДР здійснений в [4]. Доведено, що за рахунок збільшення зусилля шляхом додавання в конструкцію ІДР феромагнітного осердя є можливість зменшити енергію конденсаторної батареї живлення індуктора (ємність та початкову зарядну напругу), а отже суттєво зменшити габарити блоку конденсаторів.

Для експериментальних досліджень був обраний автоматичний вимикач серії ВА3700. Конструктивною особливістю цих вимикачів є застосування в якості дистанційного розчіплювача електромагніту з якорем поворотного типу. Щоб уникнути конструктивних змін базової конструкції автоматичного вимикача, існуючий розчіплювач був замінений на ІДР з феромагнітним осердям і якорем саме поворотного типу.

На рис. 1 наведена кінематична схема розробленої конструкції ІДР. Якір 1 механічно пов'язаний з рейкою 4, що обертається і звільняє важіль 5 механізму вільного розчеплення автоматичного вимикача. Це призводить до розмикання контактів головного кола при виникненні надструму. F_1 – початкова сила пружини, що утримує собачку засувки вимикача.

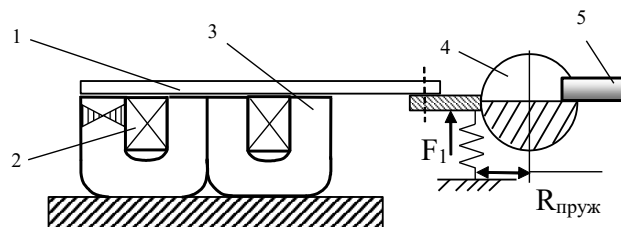


Рис. 1. Кінематична схема індукційно-динамічного розчіплювача з феромагнітним осердям та якорем поворотного типу: 1 – якір; 2 – котушка; 3 – феромагнітне осердя; 4 – рейка засувки вимикача; 5 – важіль

Задачі експериментального дослідження наступні:

1. Дослідити динамічні характеристики макетного зразку ІДР з феромагнітним осердям та якорем поворотного типу.

2. Визначити власний час спрацьовування ІДР за різних значень таких електричних параметрів конденсаторної батареї, як ємність та початкова зарядна напруга на конденсаторі, при різних параметрах котушки індуктора та радіусі диску.

3. Визначити параметри, що мають найбільший вплив на зменшення часу спрацьовування автоматичного вимикача з метою їх подальшої оптимізації.

Відома математична модель ІДР подана системою інтегро-диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні перехідні процеси в магнітозв'язаних електричних контурах робочої котушки і рухомого елемента розчіплювача (якоря), рівняння розряду конденса-

торної батареї, рівняння для зусилля, що діє на рухомий елемент у напрямку руху [3]. Зважаючи на складність перехідних процесів у ІДР, вирішення цих рівнянь можливе лише з використанням чисельних методів.

У [5] математична модель ІДР з магнітною системою також містить рівняння електричного кола та зусилля, що діє на рухомий елемент, але вона доповнена рівняннями магнітного кола з урахуванням кінцевих величин магнітних провідностей ділянок магнітної системи:

$$\begin{cases} u_c(t) = R_1 \cdot i_1(t) + w_1^2 \cdot G_{11} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + w_1^2 \cdot i_1(t) \cdot \frac{dG_{11}}{dt} - \\ \quad - w_1 \cdot w_2 \cdot G_{12} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - w_1 \cdot w_2 \cdot i_2(t) \cdot \frac{dG_{12}}{dt}; \\ 0 = R_2 \cdot i_2(t) - w_2^2 \cdot G_{22} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - w_2^2 \cdot i_2(t) \cdot \frac{dG_{22}}{dt} + \\ \quad + w_1 \cdot w_2 \cdot G_{12} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + w_1 \cdot w_2 \cdot i_1(t) \cdot \frac{dG_{12}}{dt}; \\ u_c(t) = U_{C0} - \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) \cdot dt; \\ \sum_k \left(\frac{\Phi'_k}{G'_k} + \frac{\Phi'_k}{G'_{\mu k}} \right) = P_1(t) \quad k = (\overline{1, K}); \\ \sum_k \left(\frac{\Phi''_k}{G''_k} + \frac{\Phi''_k}{G''_{\mu k}} \right) = P_2(t); \\ \sum_j \Phi'_j = 0 \quad j = (\overline{1, J}); \\ \sum_j \Phi''_j = 0; \\ m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \frac{\Phi_\delta^2(t)}{2\mu_0 S_\delta} - F_c; \\ \mu = \mu(B, H). \end{cases} \quad (2)$$

Запропонована у [5] модель найбільш точно відображає фізику процесів розподілу струмів та магнітних потоків в ІДР при його спрацьовуванні та підвищує точність розрахунків.

Конструкція макетного зразка ІДР. Для проведення експериментальних досліджень та вирішення поставлених задач виготовлено макетний зразок ІДР з магнітною системою та якорем поворотного типу (рис. 2).

Обмотка ІДР намотана мідною стрічкою. ІДР встановлено в правий полюс автоматичного вимикача ВА3792.

При проведенні експериментальних досліджень власного часу спрацьовування ІДР в залежності від електричних параметрів розрядного контуру системи керування використовувалися дві електричні схеми (рис. 3), одна з яких забезпечувала коливальний характер розряду ємності конденсатора на обмотку індуктора ІДР (рис. 3, а), а інша – аперіодичний (рис. 3, б).

Геометричні параметри ІДР:

- висота котушки - 10 мм;
- товщина мідної стрічки котушки – 0,1 мм та 0,05 мм;
- кількість витків котушки – 45 та 60;
- переріз осердя – 12×25 мм
- розмір внутрішнього вікна осердя – 15 мм;
- висота осердя – 20 мм
- товщина якоря – 1 мм.



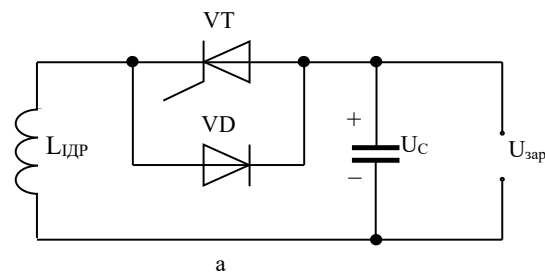
а



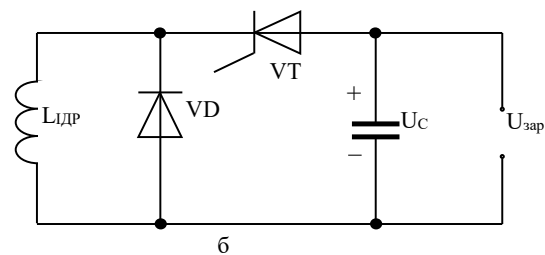
б

Рис. 2. Конструкція ІДР з магнітною системою з якорем поворотного типу:

а) автоматичний вимикач ВА3792 з ІДР; б) ІДР



а



б

Рис. 3. Електричні схеми підключення обмотки ІДР:
а) коливальний процес; б) аперіодичний процес

Результати досліджень. Дослідження часу спрацьовування ІДР проводилося при двох величинах напруги на конденсаторі $U_{C1}=200$ В; $U_{C2}=300$ В. На обмотку ІДР подавався імпульс з конденсатору за однією зі схем (рис. 3). При кожній нарузі на конденсаторі досліджувався вплив ємності конденсаторної батареї, яка також мала два значення $C_1=100$ мкФ та $C_2=200$ мкФ. Товщина мідної стрічки, якою намотана обмотка ІДР, 0,05 мм та 0,1 мм, відповідно кількість витків обмотки

60 та 45. Кількість витків обмотки та її ширина обмежена розмірами магнітної системи. Кут спрацьовування ІДР α дорівнює 0,06 рад. Варіювання товщини обмотувальної стрічки здійснювалося з метою визначення залежності часу спрацьовування від параметрів обмотки. Вплив товщини стрічки котушки на власний час спрацьовування ІДР при різних схемах підключення конденсатора приведено на рис. 4.

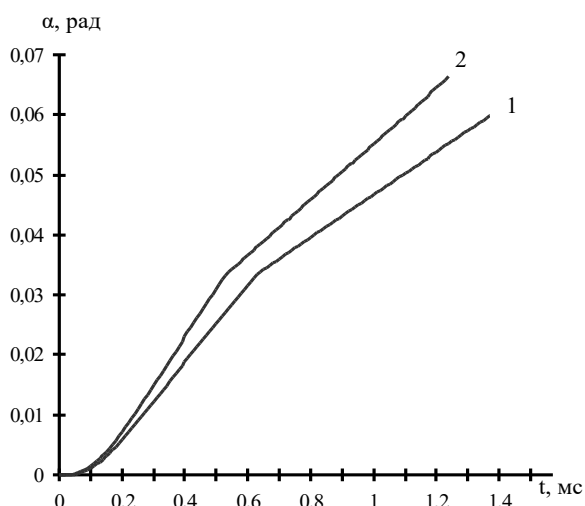


Рис. 4. Вплив схеми підключення конденсатора до обмотки ІДР: товщина стрічки 0,1 мм, витків 45: 1 – аперіодичний процес; 2 – коливальний процес

З отриманих характеристик можна зробити висновок, що час спрацьовування ІДР зменшується при коливальному характері розряду ємності зі зростанням кількості витків і товщини стрічки.

Вплив товщини стрічки та числа витків обмотки на швидкість ІДР при коливальному розряді ємності приведено на рис. 5. Характеристики на (рис. 5, а) отримані для обмоток, намотаних мідною стрічкою 0,1 мм при напрузі на конденсаторі $U_{C1}=200$ В; $C=200$ мкФ. Характеристики на (рис. 5, б) отримані для обмоток, намотаних мідною стрічкою 0,05 мм при напрузі на конденсаторі $U_{C1}=200$ В; $C=100$ мкФ.

Дані експериментальних досліджень власного часу спрацьовування t_{op} макетного зразка ІДР при різних значеннях електричних параметрів розрядного контуру, а саме ємності та початковій зарядній напрузі на конденсаторі, товщині стрічки Δ_s рівній 0,05 мм та 0,1 мм, при різних схемах підключення конденсатора до обмотки розчіплювача, зведені до табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Власний час спрацьовування ІДР t_{op} при $U_{C1}=200$ В

U_{C1} , V		200			
C, μ F		100		200	
Δ_s , mm		0,05	0,1	0,05	0,1
t_{op} , ms	аперіодичний	2,51	1,56	2,37	1,38
	коливальний	2,33	1,24	2,15	1,21

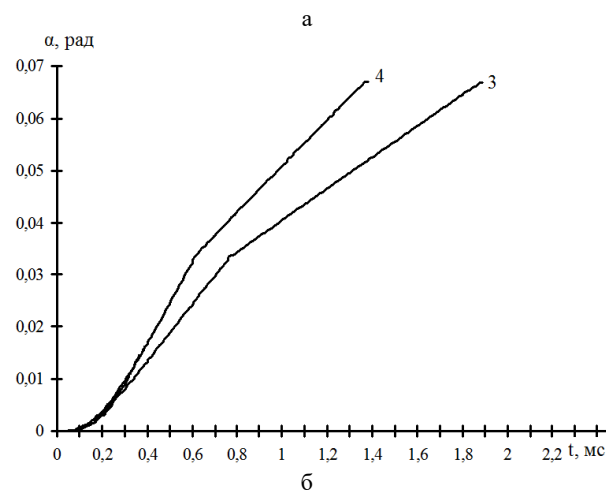
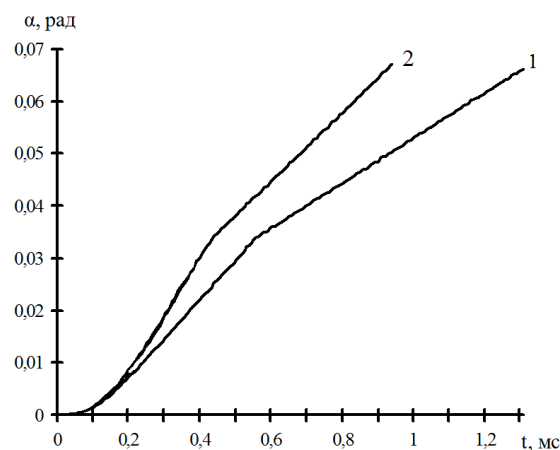


Рис. 5. Вплив товщини стрічки та числа витків обмотки на швидкість ІДР: 1, 3 – 45 витків; 2, 4 – 60 витків; а – напруга $U_{C1}=200$ В; $C=200$ мкФ; б – напруга $U_{C1}=200$ В; $C=100$ мкФ

Таблиця 2 – Власний час спрацьовування ІДР t_{op} при $U_{C2}=300$ В

U_{C2} , V		300			
C, μ F		100		200	
Δ_s , mm		0,05	0,1	0,05	0,1
t_{op} , ms	аперіодичний	1,52	1,17	1,24	0,93
	коливальний	0,97	0,84	0,87	0,72

Зниження індуктивності мережевих реакторів перетворювачів частоти. Індуктивність мережевих реакторів визначається з міркувань зниження теплового впливу струму короткого замикання на напівпровідниковий пристрій за час, необхідний для спрацьовування автоматичного вимикача. При зменшенні часу спрацьовування автоматичного вимикача завдяки заміні електромагнітного розчіплювача на індукційно-динамічний, надається можливість зниження індуктивності мережевих реакторів перетворювачів частоти.

Розглянемо випадок внутрішнього короткого замикання керованого випрямляча. Тиристорний електропривод потужністю 250 кВт ($I_n = 658$ А, $U = 380$ В) підключено до живильного трансформатора 1000 кВА. Усереднені параметри такої мережі: $\omega L_T = 9 \cdot 10^{-3}$ Ом ($L = 28$ мкГн), $R_T = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Ом, де ωL_T , R_T – сумарний реактивний та активний опір однієї фази повної схеми заміщення, наведені до вторинної обмотці живильного трансформатора.

При пробі вентилля в одному плечі мосту у момент

комутації вентилів в іншому плечі, утворюється контур двофазного короткого замикання через пробитий вентиль. З погляду величини та тривалості аварійного струму двофазне коротке замикання є найважчим випадком. Завдання захисного апарату полягає в тому, щоб врятувати непошкоджений вентиль в контурі короткого замикання, що утворився.

Для забезпечення надійного захисту напівпровідникового випрямляча автоматичним вимикачем повинна виконуватись умова:

$$\int_0^t i^2 \cdot dt < (i^2 \cdot t)_{\text{доп}}, \quad (3)$$

де t – час дії аварійного струму; i – миттєве значення аварійного струму; $(i^2 \cdot t)_{\text{доп}}$ – допустима перевантажувальна здатність напівпровідникового пристрою.

Аварійний струм у перетворювачі буде розвиватися за наступним законом [6].

$$i_{к.з} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi, \max}}{2 \cdot \sqrt{R_T^2 + (\omega \cdot L_T)^2}} \times \left[\sin(\omega \cdot t) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_T}{\omega \cdot L_T}(\omega \cdot t - \alpha)} \right], \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L_T}{R_T}\right).$$

де $U_{\phi, \max}$ – амплітудне значення фазної напруги.

В якості прикладу розглянемо керований випрямляч на тиристорних модулях типу МТ-320-14 із паспортним значенням допустимого інтегралу Джоуля $I^2t = 720 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$. Індуктивність мережевих реакторів, яка необхідна для того, щоб повний інтеграл відключення автоматичним вимикачем, розрахований за рівнянням (3) та при підстановці в нього рівняння (4), не перевищив паспортного значення тиристорного модуля МТ-320-14 відповідно: для автоматичного вимикача ВА3792 з електромагнітним дистанційним розчіплювачем $L_{\text{мереж}} = 173.4 \text{ мкГн}$; для автоматичного вимикача ВА3792 з ІДР з феромагнітним осердям $L_{\text{мереж}} = 77.6 \text{ мкГн}$.

Висновки. 1. Застосування феромагнітного осердя в конструкції ІДР автоматичного вимикача ВА 3792 дозволило знизити початкову зарядну напругу на конденсаторі в 1,67 раз у порівнянні з конструкцією без феромагнітного осердя.

2. В результаті застосування ІДР з феромагнітним осердям та якоря поворотного типу у вигляді мідного

диску час спрацьовування автоматичного вимикача зменшився в 1,78 раз.

Список літератури

1. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Применение автоматических выключателей серии А3700 с индукционно-динамическим расцепителем для защиты полупроводниковых преобразователей // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – 2001. - №14. – С. 315-322.
2. Bissal A. On the design of ultra-fast electromechanical Actuators. Licentiate thesis, monograph. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2013. 68 p.
3. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Математическая модель и динамические характеристики электродинамического расцепителя быстродействующего автоматического выключателя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. №83. Серия "Новые решения в современных технологиях". Харьков, 2000 г. С.71-73.
4. Литвиненко В.В., Лупиков В.С., Серeda А.Г. Качественный анализ влияния ферромагнитного сердечника на величину силы индукционно-динамического привода // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – Вип. 29. – С. 57-64.
5. Литвиненко В.В., Лупиков В.С., Серeda А.Г. Усовершенствованная математическая модель индукционно-динамического привода автоматического выключателя // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип. 40. – С. 66-83.
6. Глух Е.М., Зеленев В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1982. - 152 с.

References (transliterated)

1. Klimentko B.V., Bajda E.I., Sereda A.G. Primenenie avtomaticheskikh vyklyuchatelej serii A3700 s indukcionno-dinamicheskim rascepitelem dlya zashchity poluprovodnikovyh preobrazovatelej. Bulletin NTU "HPI". 2001. No 14. Pp. 315-322.
2. Bissal A. On the design of ultra-fast electromechanical Actuators. Licentiate thesis, monograph. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2013. 68 p.
3. Klimentko B.V., Bajda E.I., Sereda A.G. Matematicheskaya model' i dinamicheskie harakteristiki elektrodinamicheskogo rascepitya bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vyklyuchatelya. Vestnik Har'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. №83. Seriya "Novye resheniya v sovremennyh tekhnologiyah". Har'kov, 2000 g. Pp.71-73.
4. Litvinenko V.V., Lupikov V.S., Sereda A.G. Kachestvennyj analiz vliyaniya ferromagnitnogo serdechnika na velichinu sily indukcionno-dinamicheskogo privoda. Bulletin NTU "HPI". Kharkiv: NTU "HPI". 2010. Vol. 29. – Pp. 57-64.
5. Litvinenko V.V., Lupikov V.S., Sereda A.G. Usovershenstvovannaya matematicheskaya model' indukcionno-dinamicheskogo privoda avtomaticheskogo vyklyuchatelya. Bulletin NTU "HPI". – Kharkiv: NTU "HPI". 2008. Vol 40. Pp. 66-83.
6. Gluh E.M., Zelenov V.E. Zashchita poluprovodnikovyh preobrazovatelej. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Energoizdat, 1982. 152 p.

Надійшла (received) 12.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Литвиненко Вікторія Володимирівна (Литвиненко Виктория Владимировна, Lytvunenko Viktoriia Vladimirovna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: yikalitv21082@gmail.com

Серeda Олександр Григорійович (Серeda Александр Григорьевич, Sereda Alexander Grigorievich) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: o.g.sereda@gmail.com

Варшамова Ірина Сергіївна (Варшамова Ирина Сергеевна, Varshamova Iryna Serhiivna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com

Король Олена Геннадіївна (Король Елена Геннадьевна, Korol' Olena Hennadiivna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: korolelgn@gmail.com