

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Сабалаєва Наталія Олегівна**

УДК 621.316 : 621.382.2/.3

ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ПОКРАЩЕННЯ  
КОМУТАЦІЙНИХ І МАСОГАБАРИТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГІБРИДНИХ КОНТАКТОРІВ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теоретичної і загальної електротехніки Харківської національної академії міського господарства Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
Сосков Анатолій Георгійович,  
Харківська національна академія міського  
господарства,  
завідувач кафедри теоретичної і загальної  
електротехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Дзюбан Віталій Серафимович,  
ЗАТ «Донецьксталь – металургійний  
завод»,  
перший заступник директора дирекції зі  
стратегії поставок електротехнічної про-  
дукції

доктор технічних наук, професор Климен-  
ко Борис Володимирович,  
Національний технічний університет «Ха-  
рківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри електричних апаратів

Захист відбудеться «20» травня 2010 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий «10» квітня 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Гібридні контактори, які відносять до електричних напівпровідникових апаратів, поєднують у собі позитивні властивості як контактних, так і безконтактних апаратів за рахунок використання напівпровідникового ключа, що підключений паралельно до головних контактів апарату. Це дозволило майже повністю скоротити зону можливого дугоутворення і внаслідок цього суттєво підвищити комутаційну зносостійкість гібридних контакторів у порівнянні з класичними комутаційними апаратами.

Напівпровідниковий ключ є основним вузлом гібридного контактора, що визначає технічні характеристики апарату в цілому. Застосування у якості напівпровідникового ключа сучасних силових напівпровідникових приладів дозволяє значно покращити технічні параметри гібридних контакторів. Останні роки характеризуються впровадженням інтегральних технологій у виробництво силових напівпровідникових приладів, що призвело до створення надпотужних повністю керованих силових напівпровідникових приладів, у тому числі з польовим керуванням, а саме двоопераційних тиристорів типів *GTO* і *IGCT* і комбінованих біполярних транзисторних ключів типу *IGBT*; отримали подальшого розвитку й одноопераційні тиристири зі зниженим прямим падінням напруги і перевантажувальною здатністю до 50 кА. Це дозволяє майже на два порядки підвищити потужність перемикачів напівпровідникових ключів при суттєво більш високих частотах.

Таким чином, наведені досягнення в силовій електроніці створюють реальні перспективи для подальшого розвитку й удосконалення гібридних контакторів низької напруги, що розроблені ще в 70 – 80-х роках минулого століття і вже не відповідають сучасним вимогам промисловості, особливо в частині габаритів і вартості, що обмежує галузі їх застосування. При цьому накопичений досвід їх експлуатації, що виявив переваги й недоліки, дозволяє виконувати роботи зі створення гібридних контакторів з покращеними технічними характеристиками з урахуванням вищезазначених досягнень в силовій електроніці більш цілеспрямовано й обґрунтовано. Природно, виникає необхідність у системних дослідженнях електромагнітних і теплофізичних процесів, що протікають у колах цих контакторів при комутації, з метою створення удосконалених методів розрахунку для проектування конкурентоспроможних зразків вказаних електричних апаратів.

Таким чином, актуальною є задача покращення комутаційних і масогабаритних характеристик гібридних комутаційних апаратів, яка складає напрям дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі теоретичної і загальної електротехніки Харківської національної академії міського господарства в рамках держбюджетних тем «Розробка перспективних зразків електричних машин і апаратів та створення їх теорії» (1.01.2004 – 1.12.2007, ДР № 0104u004615) і «Створення нових і удосконалення існуючих електричних машин і апаратів та методик їх розрахунку і проектування» (1.01.2008 – 1.12.2011, ДР № 0108u004541), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є покращення комутаційних і масогабаритних характеристик гібридних контакторів низької напруги шляхом розробки принципово нових технічних рішень. Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені наступні задачі:

- провести аналіз існуючих гібридних комутаційних апаратів керування і обґрунтувати основні принципи побудови гібридних контакторів низької напруги з покращеними технічними характеристиками з урахуванням сучасних тенденцій розвитку силової електроніки;

- виконати дослідження нестационарних електромагнітних процесів при вимиканні електричних кіл гібридними контакторами, на підґрунті яких з урахуванням узагальнення відомих досліджень удосконалити інженерні методики розрахунку дії струмового навантаження і комутаційних перенапруг на силові напівпровідникові прилади у специфічних умовах їх роботи;

- дослідити нестационарні теплові процеси в силових напівпровідникових приладах напівпровідникових ключів гібридних контакторів, у тому числі з урахуванням стохастичного характеру струмового навантаження на ці прилади, внести уточнення до інженерної методики розрахунку теплового режиму силових напівпровідникових приладів в умовах їх роботи у складі гібридних контакторів;

- розробити й обґрунтувати перспективні технічні рішення, що дозволять створювати конкурентоспроможні зразки гібридних контакторів низької напруги з покращеними комутаційними, масогабаритними й вартісними характеристиками;

- виконати експериментальні дослідження для апробації теоретичних висновків щодо процесів, які мають місце в силових колах гібридних контакторів.

*Об'єкт дослідження* – нестационарні електромагнітні й теплові процеси, які мають місце в силових колах гібридних контакторів.

*Предмет дослідження* – гібридні низьковольтні контактори змінного і постійного струму.

*Методи дослідження.* Для дослідження перехідних електромагнітних процесів у колах гібридних контакторів застосовано методи теорії кіл з використанням методів теорії ймовірності; для дослідження нестационарного температурного поля силових напівпровідникових приладів застосовано інтегрування рівнянь теплопровідності в часткових похідних, при вирішенні яких використано аналітичні й чисельні методи (перетворення Лапласа і метод кінцевих різностей); для розробки алгоритмів розрахунку використано пакети комп'ютерних програм Mathcad і Matlab; для отримання дослідних даних застосовано методи експериментальних досліджень з застосуванням поясу Роговського і безіндуктивних шунтів.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- отримали подальшого розвитку методи розрахунку температурних полів силових напівпровідникових приладів, що працюють у специфічних режимах у складі гібридних апаратів за рахунок більш точного врахування геометрії силових напівпровідникових приладів і характеру струмового навантаження, у тому числі й того, що має стохастичний характер;

- вперше показано, що розрахунок максимальної температури силових напівпровідникових приладів треба проводити при дії на прилад перехідного аварійно-

го струму, який виникає при відключенні навантаження, в момент його виникнення при несприятливих умовах:  $\cos\varphi = 0,3$ , початкова фаза напруги дорівнює нулю;

- отримала подальшого розвитку модель процесу перетікання струму в шунтуюче коло, що уточнює процес появи повторних замикань у колі головних контактів при їх розмиканні і пояснює їх випадковий характер;

- вперше при розрахунку комутаційних перенапруг ураховано залежність процесу зворотного відновлення силового напівпровідникового приладу від швидкості спаду струму в його колі.

**Практичне значення одержаних результатів** для галузі електроапаратобудування:

- розроблено на рівні винаходів принципові схеми гібридних контакторів змінного і постійного струму (захищені 4 патентами), що дозволяють створювати зразки апаратів із суттєво покращеними комутаційними, масогабаритними й вартісними характеристиками, тобто підвищують таким чином конкурентоспроможність гібридних контакторів на світовому ринку низьковольтних апаратів;

- уточнені методики розрахунку електромагнітних і теплових процесів, що мають місце в основних вузлах гібридних контакторів, які виконані з використанням стандартних комп'ютерних програм, що суттєво знижує трудомісткість проектування гібридних контакторів, дозволяючи застосовувати прогресивні методи автоматизованого проектування.

Практичні рекомендації, які випливають з результатів досліджень, технічні рішення та методики розрахунку використовуються при модернізації на ЗАТ «ЕНАС» (м. Харків) гібридних контакторів змінного струму серій КТ64 и КТП64 і постійного струму серії КП81. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі електричного транспорту Харківської національної академії міського господарства.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертації одержані здобувачем особисто, серед них: розробка технічних вимог до удосконалених гібридних контакторів і принципів їх побудови; обґрунтування нових технічних рішень зі створення гібридних контакторів з покращеними характеристиками; постановка задачі й результати теоретичних досліджень нестационарних електромагнітних і теплових процесів у колах гібридних контакторів з урахуванням як специфічного характеру навантаження на силові напівпровідникові прилади їх напівпровідникових ключів, так і динамічних характеристик сучасних силових напівпровідникових приладів; удосконалені методики розрахунку, які дозволяють з високою точністю розраховувати основні параметри контакторів і використаних у них силових напівпровідникових приладів; експериментальні дослідження електромагнітних процесів у вентильно-тиристорних колах гібридних контакторів при комутації навантаження і розроблені технічні засоби для них.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи доповідались і обговорювались на: Міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів» (Харків, 2007 – 2009 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Новітні технології та енергоефективність у світлотехніці й електроенергетиці» (Харків, 2007 р.); XXXIV науково-технічній конференції викладачів,

аспірантів і співробітників Харківської національної академії міського господарства, (Харків, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Новітні технології в електроенергетиці» (Харків, 2008 р.); Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Новітні технології в електроенергетиці» (Харків, 2009 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 21 науковій праці, з них 13 статей у фахових виданнях ВАК України і 4 патентах України на корисну модель.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок, з них 61 рисунок по тексту, 2 рисунки на 2 окремих листах, 15 таблиць по тексту, 2 таблиці на 2 окремих листах, 4 додатки на 15 сторінках, список використаних джерел зі 111 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, дані щодо апробацій та публікацій результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз науково-технічних і патентних джерел інформації стосовно будови як окремих вузлів гібридних контакторів, так і апаратів у цілому. При цьому основної уваги приділено аналізу тих схемних рішень, що пройшли апробацію у вітчизняних і зарубіжних промислових зразках гібридних контакторів і показали свою практичну цінність. Порівняльний аналіз, виконаний на основі запропонованих критеріїв, що визначають якість гібридного контактора, а також з урахуванням аналізу стану й тенденцій розвитку силових напівпровідникових приладів (СНП) показав, що за якістю бездугової комутації, масогабаритними показниками та надійністю існуючі контактори не в повній мірі задовольняють сучасним вимогам, що ставляться до них. При цьому встановлено, що в процесі створення гібридних контакторів на напругу до 1000 В з покращеними технічними характеристиками слід керуватися наступними принципами побудови їх основних вузлів: гібридні контактори змінного струму переважно виконувати на базі силового гібридного ключа (СГК) з двома зустрічно-паралельно включеними тиристорами, що розташовані конструктивно в одному модулі, з їх природною комутацією, а також безконтактною схемою керування (СК) з керуванням від струму в колі головних контактів (ГК); гібридні контактори постійного струму доцільно виконувати на базі СГК, в якому в якості основного ключа застосований повністю керований прилад (*IGBT*-ключ або двоопераційний тиристор), що дозволить виключити недоліки, які мають місце при використанні в цій ролі одноопераційних тиристорів; роботою СК цих контакторів, як і контакторів змінного струму, переважно керувати від струму в колі ГК.

Наведений аналіз стану питання дозволив сформулювати мету роботи й встановити задачі дослідження.

У другому розділі виконано дослідження нестационарних електромагнітних процесів при вимиканні електричних кіл гібридними контакторами, які необхідні для визначення режимів роботи за струмом і напругою головного елеме-

нта цих апаратів – СГК, а також для розробки удосконалених методик їх розрахунку. Застосування в силових ключах у складі напівпровідникових ключів (НК) сучасних СНП змінює характер цих досить складних нестаціонарних процесів, що, як правило, мають ще й вірогідний характер. У зв'язку з цим з метою більш глибокого вивчення цих процесів виконано додаткові дослідження, що враховують відмінні особливості сучасних СНП.

Дослідження перетікання струму в СГК з кола контактів у НК при розмиканні кола раніше проводились за умови перетікання струму тільки під дією «короткої» дуги. Аналіз сучасних СНП показав, що вони відкриваються до виникнення «короткої» дуги, тому дослідження струморозподілу між контактами і шунтуючим колом з НК необхідно проводити з урахуванням падіння напруги на рідкому містку до його розриву й виникнення «короткої» дуги, оскільки воно перевищує порогову напругу сучасних СНП. У цьому випадку еквівалентна електрична схема струмового кола СГК при його розмиканні матиме вигляд, показаний на рис. 1.

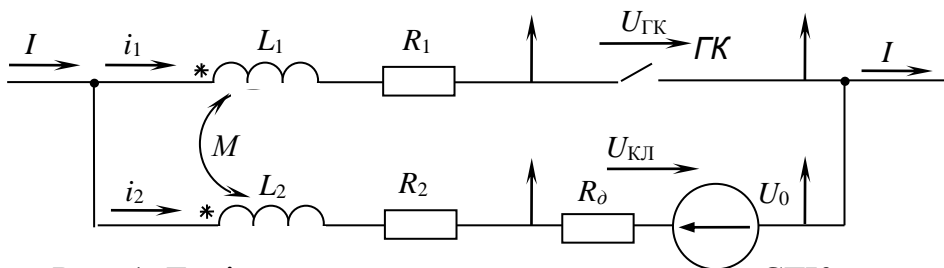


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема кола СГК при розмиканні контактів

Встановлено, що на стадії існування рідкого містка дійсно має місце перетікання струму в шунтуюче коло з НК. При цьому частка цього струму незначно збільшується зі зростанням струму, що переривається, й істотно спадає із зростанням індуктивності  $L = L_1 + L_2 - 2M$  та активного опору шунтуючого кола  $R_2' = R_2 + R_d$  і прискорення  $a$  контактів, що розмикаються ( $L_1, L_2$  – індуктивність кіл ГК і СНП,  $M$  – їх взаємоіндуктивність,  $R_2$  і  $R_d$  – активний опір шунтуючого кола і динамічний опір СНП).

Показано, що при струмах, які вимикаються,  $I > 500$  А, індуктивностях  $L \leq 0,5$  мкГн, прискореннях  $a \leq 200$  м/с<sup>2</sup> і опорі  $R_2' \leq 3$  мОм частка струму, що перетікає на стадії рідкого містка може складати понад 20 %. Проте вже при параметрах, характерних для контакторів на номінальні струми  $I_{ном} \geq 100$  А ( $L > 1,0$  мкГн,  $a > 300$  м/с<sup>2</sup> і  $R_2' > 3$  мОм), частка цього струму стає менш ніж 5 %, тому може не враховуватися при їх розробці.

Удосконалено фізичну модель процесу перетікання струму в шунтуюче коло, що пояснює можливість повторних металевих замикань у колі ГК в результаті виникнення голок на поверхні контактів по ходу плям «короткої» дуги через велику швидкість спаду струму в її колі (рис. 2). При цьому показано, що даний процес має стохастичний характер.

Аналіз струмового навантаження на СНП в різних схемах СГК змінного струму при роботі контактора в режимі нормальних комутацій показав наступне: форма кривих струму в тиристорах у сталому режимі не залежить від характеру

Встановлено, що на стадії існування рідкого містка дійсно має місце перетікання струму в шунтуюче коло з НК. При цьому частка цього струму незначно збільшується зі зростанням струму, що переривається, й істотно спадає із зростанням індуктивності  $L = L_1 + L_2 - 2M$  та активного опору шунтуючого кола  $R_2' = R_2 + R_d$  і прискорення  $a$  контактів, що розмикаються ( $L_1, L_2$  – індуктивність кіл ГК і СНП,  $M$  – їх взаємоіндуктивність,  $R_2$  і  $R_d$  – активний опір шунтуючого кола і динамічний опір СНП).

навантаження; тривалість імпульсу струму в процесі роботи має статистичний характер; в спрощених схемах бездугової комутації трифазних кіл (рис 3, в і г) тиристори більш навантажені, ніж в основній (рис. 3,б).

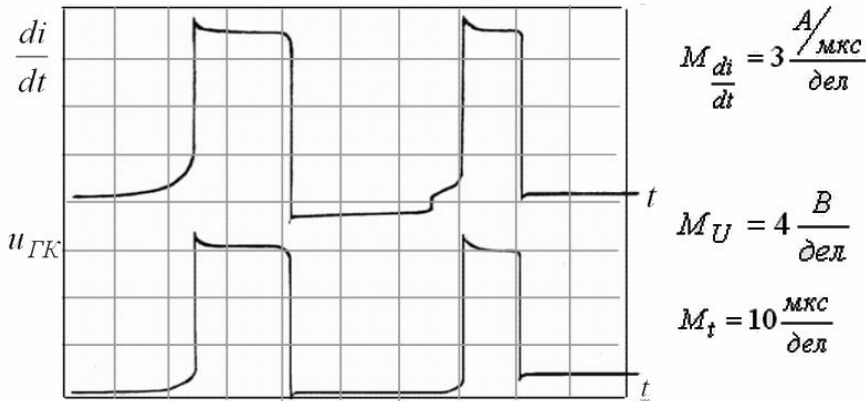


Рис. 2. Осцилограми швидкості перетікання струму в шунтуюче коло  $\left(\frac{di}{dt}\right)$  і напруги на ГК ( $U_{ГК}$ )

Отримані в результаті досліджень аналітичні вирази для струмів СНП залежно від моменту розмикання ГК і варіанта виконання ключа є вихідними даними для розрахунку струмового навантаження в повторно-короткочасному режимі, що є основним для контакторів, що розглядаються.

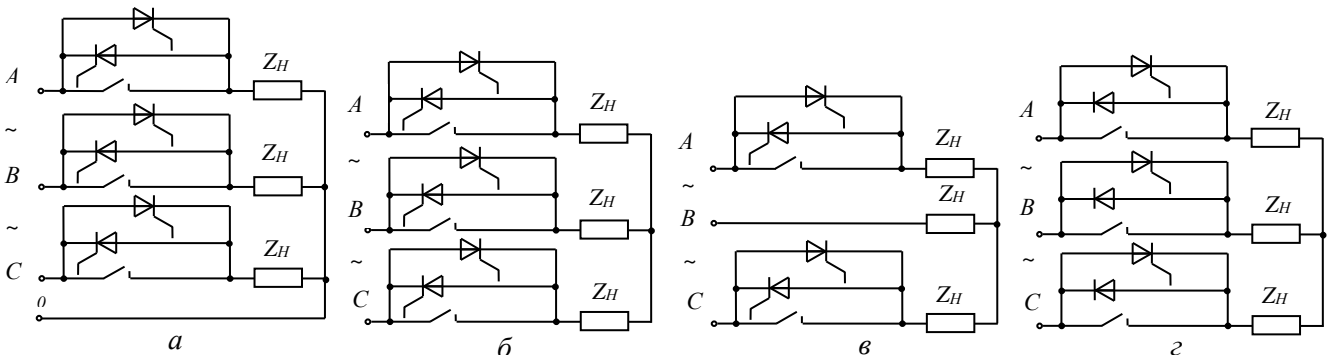


Рис. 3. Варіанти виконання трифазних СГК: а – з нульовим проводом; б, в, г – без нульового проводу ( $Z_H$  – опір навантаження).

Дослідження навантаження на СНП гібридних ключів змінного струму в аварійних режимах контактора виконано на основі розрахункової схеми, наведеної на рис. 4. Відомо, що найбільші значення аварійних струмів у колі комутаційних апаратів мають місце при симетричних трифазних коротких замиканнях або перевантаженнях. При вимиканні гібридним НА аварійних струмів, які встановилися, форма кривих струму в СНП цих апаратів буде такою, як і у випадку нормальних комутацій електричного кола. Відмінність буде тільки у величині струму, що вимикається. Однак у перехідному режимі максимальне значення аварійного струму перевищує (гранично вдвічі) амплітуду струму, що встановився. Оскільки вими-

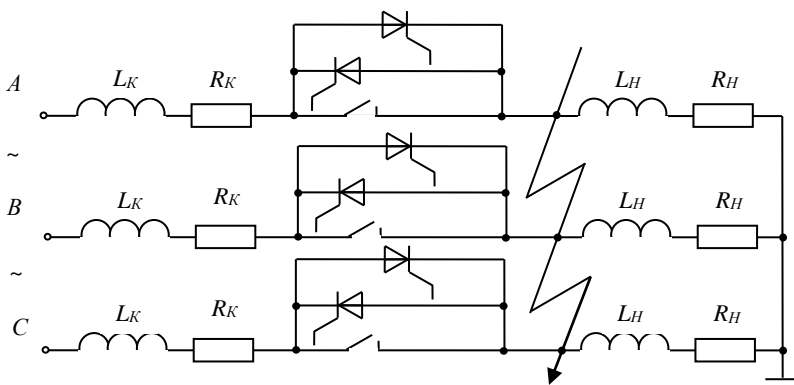


Рис. 4. Розрахункова схема короткого замикання на вихідних затискачах гібридного комутаційного НА

новився, форма кривих струму в СНП цих апаратів буде такою, як і у випадку нормальних комутацій електричного кола. Відмінність буде тільки у величині струму, що вимикається. Однак у перехідному режимі максимальне значення аварійного струму перевищує (гранично вдвічі) амплітуду струму, що встановився. Оскільки вими-



кання електричного кола апарату можливе в будь-який момент часу, то доцільним є розгляд саме цього гіршого для апаратів випадку (рис. 5).

Характер струмів у фазах при замкнених ГК матиме вигляд:

$$i_A^* = \sin(\vartheta - \varphi_K) + e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau_K}} \sin \varphi_K; \quad i_B^* = \sin(\vartheta - \varphi_K - 2\pi/3) + e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau_K}} \sin(\varphi_K + 2\pi/3);$$

$$i_C^* = \sin(\vartheta - \varphi_K + 2\pi/3) + e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau_K}} \sin(\varphi_K - 2\pi/3), \quad (1)$$

де  $i_A^* = \frac{i_A}{I_m}$ ;  $i_B^* = \frac{i_B}{I_m}$ ;  $i_C^* = \frac{i_C}{I_m}$  – відносні значення струмів;  $I_m$  – амплітуда фазного струму;  $\vartheta = \omega t$  – фаза струму;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $\tau_K = \frac{L_K}{R_K}$  – постійна часу кола в аварійних режимах;  $\varphi_{\hat{E}}$  – кут зсуву фази навантаження кола в аварійних режимах.

У результаті аналізу струмового навантаження на СНП в досліджуваному режимі встановлено, що найбільш навантаженими будуть СНП СГК при застосуванні їх в однофазних схемах або в трифазних з нульовим проводом за наступних умов: СГК розмикається у момент початку перехідного аварійного процесу, кут вмикання СНП  $\alpha = 0$ , напруга фази  $U_\phi = 0$  і  $\cos \varphi_H = 0,3$ .

Граничну перевантажувальну здатність СНП за струмом рекомендується визначати в найбільш навантаженому режимі, оскільки наперед невідомо, в якій схемі застосовуватиметься СГК в експлуатації.

При вимиканні електричних кіл гібридними контакторами виникають комутаційні перенапруги, які прикладені до СНП. Вони обумовлені енергією, накопиченою в індуктивних елементах живлячої мережі і навантаження на момент розімкнення кола, а їх величина визначається швидкістю спаду струму в колі, що вимикається.

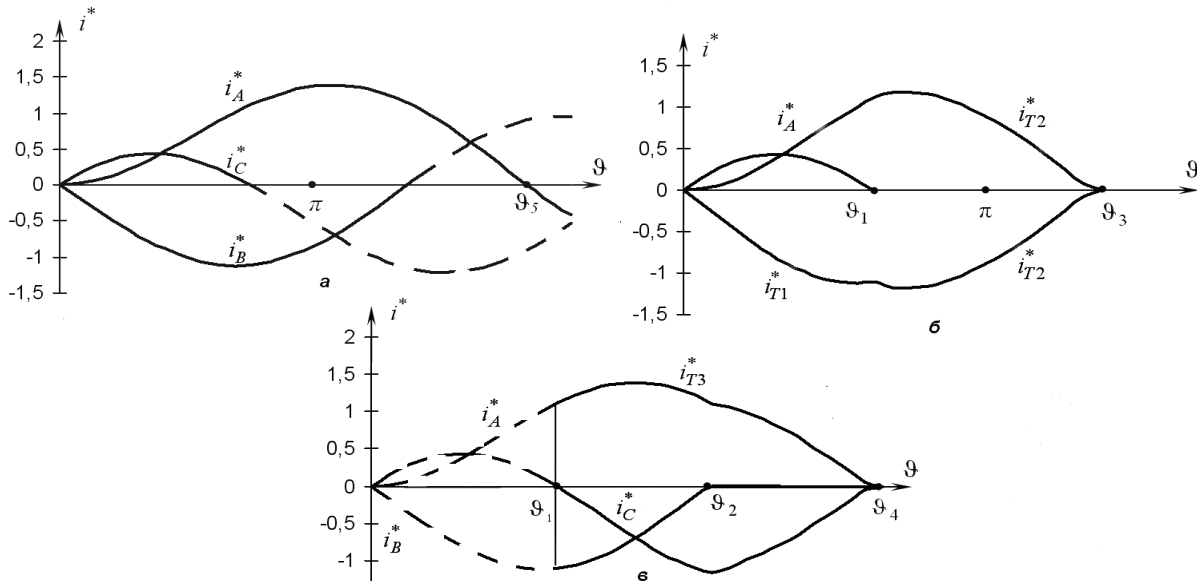


Рис. 5. Графіки перехідних процесів зміни струмів через СНП при вимиканні аварійного режиму силовим гібридним ключем у трифазних схемах: а – у схемі на рис. 3, а (або однофазній); б – у схемі на рис. 3, б, момент вмикання СНП  $\alpha = 0$ ; в – у схемі на рис. 3, б,  $\alpha = \vartheta_1$ .

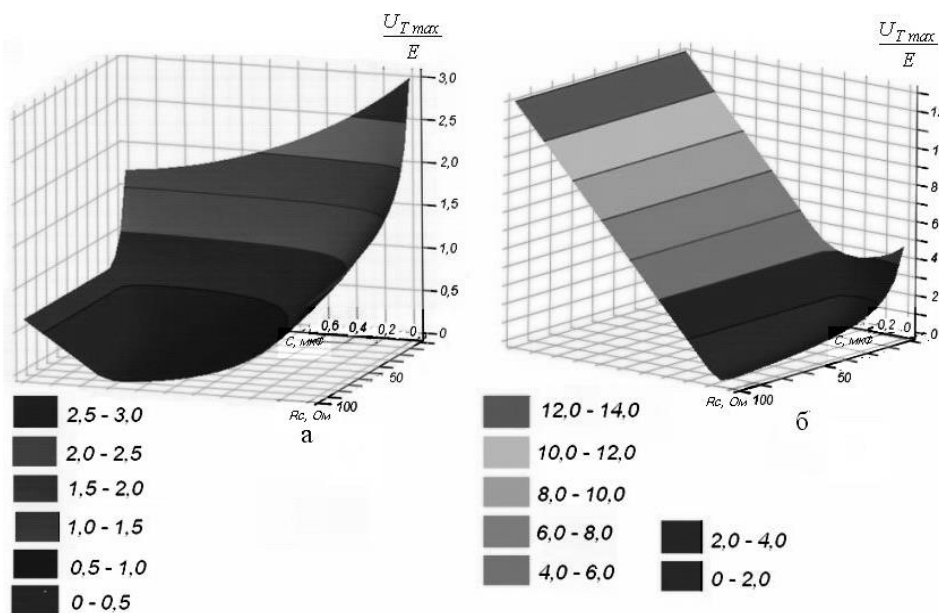
При застосуванні в НК сучасних швидкодіючих СНП вона може суттєво перевищувати напругу живлячої мережі. Оскільки вартість СНП визначається не тільки струмом, на який вони розраховані, але ще й класом приладу за напругою, необхідно вживати заходів зі зниження цих перенапруг до рівнів, близьких до мережі. Звичайно для цих цілей використовують захисні  $RC$ -кола (снаббери) і нелінійні обмежувачі напруги (варістори, стабілітрони тощо).

Існуючі методики розрахунку комутаційних перенапруг, а також параметрів захисних кіл не в повній мірі враховують динамічні характеристики СНП, а також умови комутації навантаження цими приладами у складі гібридних контакторів. Отже, через опасіння виходу з ладу НК при комутаціях клас за напругою СНП, що використовуються в таких апаратах, як правило, виявляється підвищеним, а параметри захисних кіл обрані з необґрунтованим запасом. У зв'язку з цим виникла необхідність у додаткових дослідженнях, метою яких є створення уточнених методик розрахунку комутаційних перенапруг в гібридних контакторах при вимиканні кіл як змінного, так і постійного струму, а також розробка удосконалених методик розрахунку елементів кіл захисту від цих перенапруг.

У результаті проведених досліджень комутаційних перенапруг при вимиканні гібридних контакторів і аналізу способів їх обмеження отримані такі результати.

Показано, що існуючі методики розрахунку комутаційних перенапруг не відзначаються необхідною точністю через те, що не враховують залежність процесу зворотного відновлення СНП від швидкості спаду струму в їх колі й високу стійкість сучасних СНП до дії надвисоких швидкостей зростання напруг.

Показано, що традиційні способи обмеження перенапруг не дозволяють створювати високоефективні обмежувачі перенапруг (ОП), наведені залежності  $U_{Tmax}/E$  від параметрів захисного  $RC$ -кола, що підтверджують це положення



( $E = kU_{Em} \sin \varphi$  – напруга, що відновлюється,  $k = U_{\phi} / U_{\phi ном}$  – величина відхилення фазної напруги від номінальної,  $U_{Am}$  – амплітуда еквівалентної напруги, що прикладається до НК в момент проходження струму в його колі через нуль) (рис. 6).

Рис. 6. Графік залежності  $U_{Tmax}/E$  при різних параметрах захисного  $RC$ -кола тиристора типу T153-630, струм, що вимикається: а – 630 А; б – 6300 А.

Запропоновано ОП для гібридних контакторів змінного струму, в якому паралельно до захисного  $RC$ -кола додатково введений варістор, що дозволило на порядок зменшити ємність конденсатора  $RC$ -кола і струм витоку СГК, а також суттєво (до 30 %) знизити рівень комутаційних перенапруг, що дасть можливість знизити клас СНП (наприклад, у мережах 380 В з десятого до сьомого) (табл. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунку параметрів захисного  $RC$ -кола із застосуванням варісторів

Ном. струм контактора $I_{\text{н}}$ , А	Тип тиристора і його клас	Тип варістора	Параметри $RC$ -кола		$U_{T\text{max}}/E$	$\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{\text{max}}$ , В/мкс	$W$ , Дж
			$R_c$ , Ом	$C$ , мкФ			
160	T161-160-7	СН2-2-470В	22,0	0,05	1,19	217,0	0,301
250	T171-250-7	СН2-2-470В	15,0	0,1	1,18	184,0	0,476
400	T143-400-7	СН2-2-470В	10,0	0,15	1,23	304,0	1,464
630	T153-630-7	СН2-2-470В	5,1	0,22	1,25	320,0	1,757

$R_c$  і  $C$  – активний опір і ємність  $RC$ -кола,  $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{\text{max}}$  – швидкість зростання напруги на СНП,  $W$  – енергія варістора.

Запропоновано ОП для гібридних контакторів постійного струму, в якому замість застосовуваних раніше імпульсних конденсаторів великої ємності застосовані послідовно-паралельно ввімкнені енергоємні варістори, що дозволило на порядок і більше зменшити габарити, масу й вартість ОП, а також знизити клас керованого СНП з десятого до шостого при застосуванні контактора у мережах з напругою 220 В. Удосконалені методики розрахунку дії струмового навантаження і комутаційних перенапруг на СНП зведені до вигляду, зручного для розрахунків на ЕОМ у Mathcad і впроваджені у виробництво на ЗАТ «ЕНАС».

У третьому розділі виконані дослідження теплового режиму СНП в умовах роботи у складі гібридних контакторів.

Однією з основних задач, що виникають при розробці й проектуванні вказаних апаратів, є визначення граничної температури переходу СНП і допустимої потужності розсіяння в умовах їх роботи у складі цих апаратів, оскільки вказані параметри визначають вартість і габарити НК – головного вузла розглянутих виробів. Дослідження проводили з урахуванням таких особливостей:

- включення СНП гібридних ключів при розімкненні ГК відбувається під дією невеликої напруги на «короткій» електричній дузі (близько 10 – 14 В), що виникає на ГК у процесі перетікання струму з ГК в НК (десяті частки мс);

- час протікання струму через СНП при відключенні апарату є невеликим і не перевищує 0,02 с у колах змінного струму, в колах же постійного струму ще менше і визначається тільки проміжком часу, що є необхідним для відновлення електричної міцності контактного проміжку;

- тривалість протікання струму через НК змінного струму не є постійною, а має стохастичний характер;

- сумарна енергія втрат у СНП визначається тільки статичними втратами або втратами у відкритому стані, що визначаються напругами насичення СНП і струмом навантаження, а також динамічними втратами на вимикання.

Показано, що для дослідження теплового режиму СНП у складі гібридних контакторів з метою підвищення точності доцільним є використання аналітичного методу розрахунку температури структури СНП, що виконана на базі моделі,

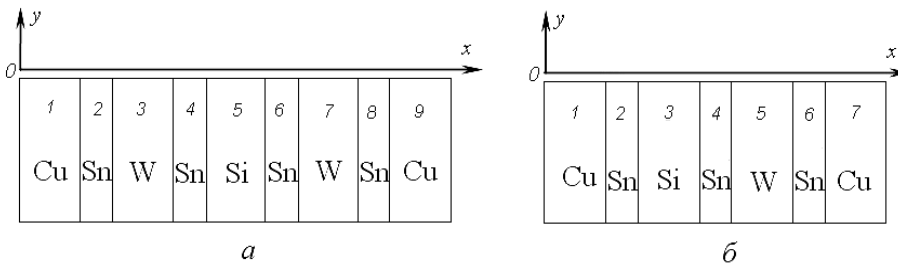


Рис. 7. Теплофізичні моделі потужних тиристорів, конструкція контактів: *a* – припаяні; *б* – притиснуті.

яка найбільш детально відтворює конструкцію приладу (рис. 7).

При виконанні розрахунку температурного поля СНП прийнято такі допущення, правомірність яких підтверджена рядом науковців: градієнт температури у площині, перпендикулярній до осі приладу, дорівнює нулю, тому задача розв'язується в одномірному наближенні; всі втрати в ключі перетворюються на тепло, що виділяється у площині кремнію паралельно до центрального переходу СНП, а визначення допустимих режимів роботи СНП засновано на оцінці температури переходу  $T_j$ , яка повинна бути нижче деякого граничного рівня, що задається у довідкових матеріалах ( $T_{jmax}$ ); вся енергія втрат виділяється в об'ємі напівпровідникової структури, тобто випадок об'ємного джерела тепла.

У такому разі розподіл перевищення температури в шарах розрахункових моделей визначається системами диференціальних рівнянь типу

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_1(\theta) \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial \theta_4}{\partial t} = a_4(\theta) \frac{\partial^2 \theta_4}{\partial x^2}, \frac{\partial \theta_5}{\partial t} = a_5(\theta) \frac{\partial^2 \theta_5}{\partial x^2} + \frac{q}{c_5 \gamma_5}, \\ \frac{\partial \theta_6}{\partial t} = a_6(\theta) \frac{\partial^2 \theta_6}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial \theta_9}{\partial t} = a_9(\theta) \frac{\partial^2 \theta_9}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (2)$$

де (2) складена для моделі з припаяними контактами;  $\theta_i$  – перевищення температури;  $q = \frac{P(t)}{V}$  – питома потужність, що виділяється у кремнієвій пластині;  $V$  – її об'єм;  $a_i(\theta) = \frac{\lambda_i(\theta)}{\tilde{n}_i(\theta) \gamma_i}$  – коефіцієнт температуропровідності;  $\tilde{n}_i(\theta)$  – питома теплоємність;  $\gamma_i$  – питома густина;  $\lambda_i(\theta)$  – коефіцієнт теплопровідності,  $i = 1, 2, \dots, n$  ( $n = 9$ ).

Граничні й початкові умови для системи рівнянь (2) такі:

1. У центрі Si пластини  $\frac{\partial \theta_5}{\partial x} = 0$  для (2) і  $\frac{\partial \theta_3}{\partial x} = 0$  для (3);
2. На межі сусідніх шарів  $-\lambda_i(\theta) \frac{\partial \theta_i}{\partial x} = -\lambda_k(\theta) \frac{\partial \theta_{i+1}}{\partial x}$  і  $\theta_i = \theta_{i+1}$ ;
3. На кінцях моделі  $-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = \alpha(\theta_1)$  і  $-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta_n}{\partial x} = \alpha(\theta_n)$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;
4. При  $t = 0$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n = 0$ .

Системи рівнянь (2) для різних конструкцій СНП розв'язані методом кінцевих різниць із застосуванням неявної схеми, обраної, виходячи з міркувань

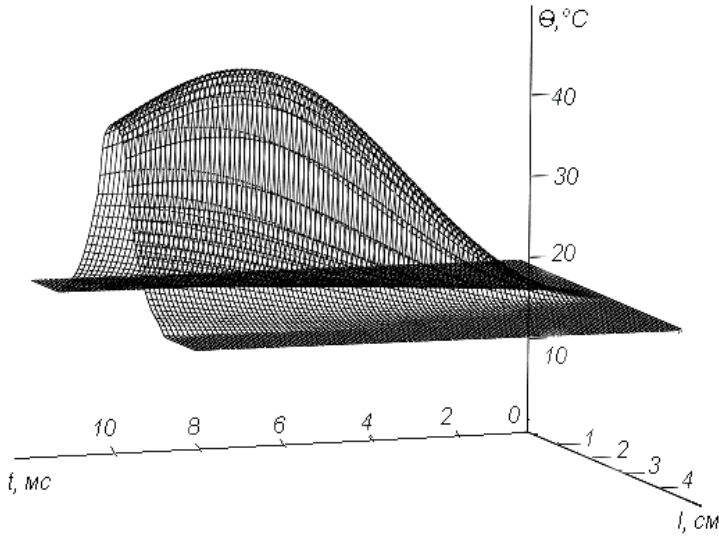


Рис. 8. Розподіл перевищення температури в структурі тиристора Т161-160 під дією синусоїдного імпульсу змінного струму 1400 А

стійкості. При цьому (2) апроксимувались системою алгебраїчних рівнянь, які розв'язували методом прогонки в середовищі Mathcad із виводом на екран тривимірних графіків розповсюдження тепла в структурі СНП з плином часу під дією на нього імпульсу потужності довільної форми (рис. 8).

При розрахунках перевищення температури за допомогою розглянутого вище методу необхідно мати інформацію, що характеризує конструкцію конкретного типу СНП. Звичайно розробники комутаційних НА не володіють такими

даними, тому здобувачем запропоновано удосконалену методику розрахунку температури структури, позбавлену вказаних недоліків, суть якої полягає:

1) вираз для перехідного теплового опору подається для конкретного типу СНП у вигляді ряду експонент типу

$$r(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}). \quad (3)$$

Для цього залежність  $\theta(t)$  для шару кремнію, що розрахована для дії на СНП прямокутного імпульсу одиничної потужності і чисельно дорівнює перехідному тепловому опору перехід-корпус, апроксимується у вигляді функції типу (3), що дозволяє отримати значення коефіцієнтів  $R_i$  і  $\tau_i$  (при  $n=2$  похибка менше 0,5 %);

2) далі для розрахунку перевищення температури структури СНП при дії імпульсної потужності довільної форми  $P(t)$  використовується формулу Дюамеля.

Для виконання розрахунків за допомогою цієї методики достатньо мати інформацію тільки про параметри СНП ( $R_\theta$ ,  $U_0$ ,  $R_{thj}$ ), що завжди є у довідниках.

Розроблений алгоритм розрахунку номінального робочого  $I_{м.р}$  й гранично допустимого струму  $I_{гр.доп}$  контактора за допомогою цієї методики (результати у табл. 2).

**У четвертому розділі** проведений аналіз удосконалених гібридних контакторів та їх експериментальні дослідження.

Удосконалення гібридних контакторів здійснюється з урахуванням розроблених у розділі 1 вимог як до окремих вузлів, так і до контакторів у цілому У результаті було розроблено три варіанти гібридних контакторів змінного струму і два варіанти гібридних контакторів постійного струму з покращеними характеристиками, виконані на рівні винаходів.

Результати розрахунку  $I_{\text{м.д}}$  і  $I_{\text{гр.доп}}$  гібридного контактора

Ном. струм контактора $I_{\text{ном}}, \text{А}$	Тип тиристора	$R_1; R_2, \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$	$\tau_1; \tau_2, \text{мс}$	$I_{\text{гр.доп}}, \text{А}$	$\frac{I_{\text{м.д}}}{I_{\text{м}}}$	
					Розр.	Прийняте
160	T161-160	0,0193; 0,0038	20,47; 1,82	1462,9	0,914	0,8
250	T171-250	0,0145; 0,0028	20,45; 1,82	2157,5	0,862	0,8
400	T143-400	0,0049; 0,0017	19,03; 1,62	3471,4	0,868	0,8
630	T143-630	0,0049; 0,0017	19,03; 1,62	5101,0	0,809	0,8

Нижче наведено принципову електричну схему варіанта гібридного контактора змінного струму (рис. 9) і варіанта гібридного контактора постійного струму (рис. 10), які найбільш повно демонструють переваги розроблених апаратів.

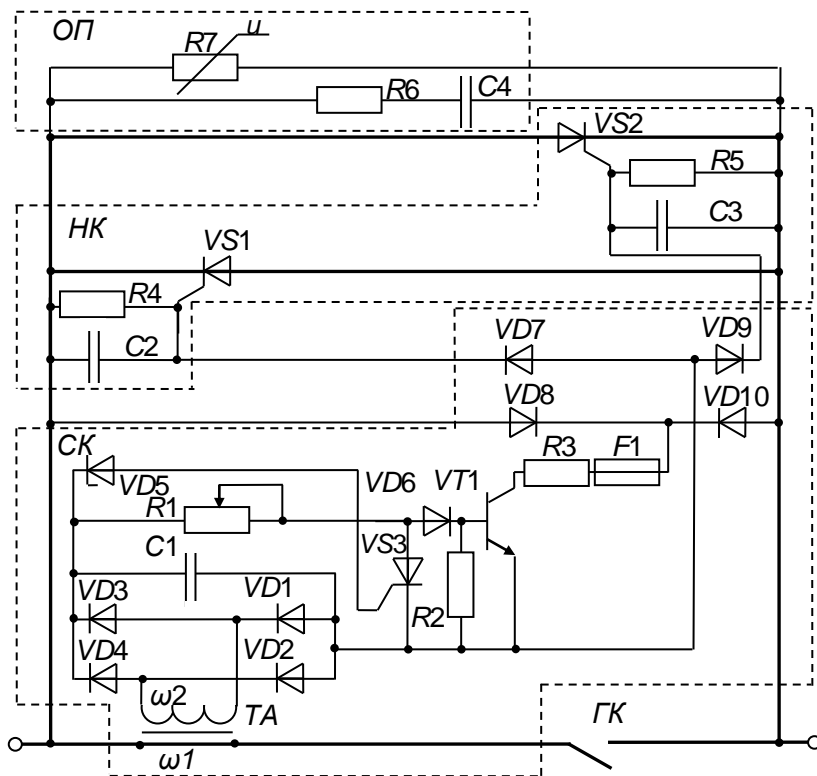


Рис. 9. Електрична схема варіанта гібридного контактора змінного струму

Гібридний контактор змінного струму (рис. 9) працює таким чином. При замиканні ГК і протіканні струму в головному колі на вторинній обмотці трансформатора струму  $TA$  виникає електричний сигнал, який через випрямляч ( $VD1 - VD4$ ) і резистор  $R1$  подається на базу  $VT1$ , переводячи його до увімкненого стану. При цьому невеликого падіння напруги на замкнених ГК недостатньо для вмикання НК.

При розходженні ГК виникає «коротка» дуга, під дією напруги на якій відбувається увімкнення тиристора НК, провідність якого відповідає напрямку струму. Струм з кола ГК і  $\omega 1$  переходить у коло НК і при повному його перетіканні струму схема керування (СК) НК знеструмлюється. Повне вимкнення кола, що комутується, відбувається при переході струму в тиристор  $VS1$  або  $VS2$  через нуль. Таким же чином НК шунтує ГК й при вібраціях у момент вмикання контактора.

Для запобігання виходу з ладу СНП НК при наскрізних струмах короткого замикання застосовано спеціальну схему захисту (елементи  $VD5, VS3, VD6$  і  $R1$ ).

Цей гібридний контактор у порівнянні з існуючими має підвищену надійність роботи, більш низьку вартість і габарити, в ньому майже на порядок знижено витрата міді й трансформаторної сталі. Вказане здійснюється зменшенням

на кілька порядків потужності керування у ввімкненому стані апарата, відсутності споживання у відімкненому стані, зниженою зоною можливого виникнення дуги при відключенні невеликих струмів, зниженням більш ніж на порядок потужності трансформатора  $TA$ , скороченням кількості вторинних обмоток до однієї.

Варіант гібридного контактора постійного струму (рис. 10) являє собою двополіусний контактор, причому повітряні зазори головних контактів ГК1 і ГК2 відрегульовані таким чином, що ГК2 розмикається після розімкнення ГК1 (час затримки складає 7 – 9 мс). Елементи ГК1, ГК2,  $VT1$ , реле  $P$  утворюють головне коло апарата, елементи  $C2$ ,  $VD2$ ,  $VD1$ ,  $R1$ ,  $K1$  – коло керування вмиканням  $VT1$ , а

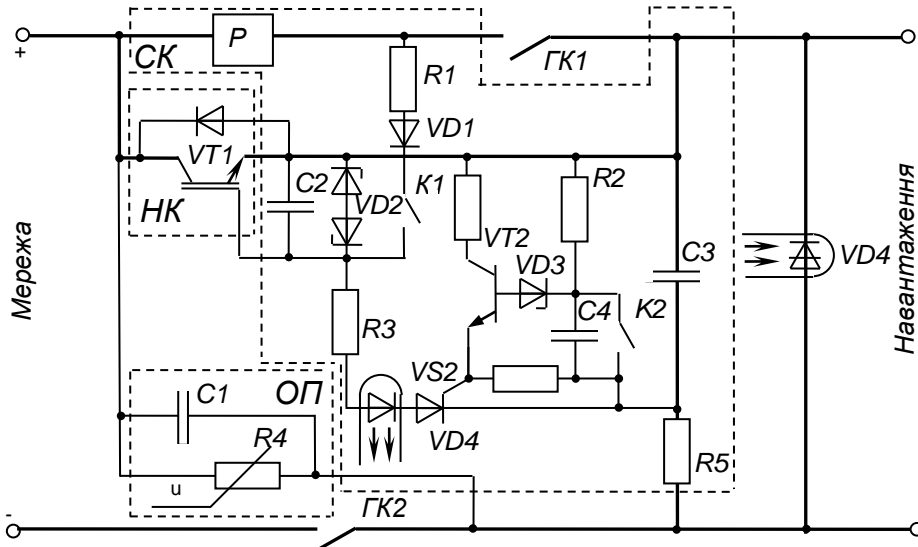


Рис. 10. Електрична схема варіанта гібридного контактора постійного струму, виконаного на базі IGBT-транзистора

елементи  $VS2$ ,  $R3$ ,  $VT2$ ,  $VD3$ ,  $R2$ ,  $C3$ ,  $C4$ ,  $K2$  – коло керування його вимиканням. У якості контактів  $K1$  і  $K2$  реле струму  $P$  використані геркони. Конструкція цього реле така сама, як і в контакторів серії КП81.

Цей контактор працює аналогічно раніше розглянутому. Відмінність полягає в тому, що транзистор  $VT1$  НК

вимикається примусово за рахунок розряду конденсатора  $C3$  через тиристор  $VS2$  і резистор  $R3$  на його вхідне коло, а також у тому, що мережа і навантаження при вимкненому стані апарата гальванічно не зв'язані.

Гібридний контактор постійного струму, що розглядається, забезпечує практично бездугову комутацію кола при вмиканні і вимиканні апарата; може бути застосовано в реверсивних схемах включення; має значно підвищену надійність роботи через спрощення СК повністю керованим СНП; у нього знижені маса, габарити й вартість напівпровідникового блока до рівня, досягнутого для контакторів змінного струму, знижений рівень комутаційних перенапруг до менше ніж  $2,5U_{ном}$ , що дозволяє знизити клас за напругою СНП з 10-го до 6-го; НК керується струмом, що протікає по колу ГК без використання додаткових джерел живлення.

Застосовувати гібридні контактори доцільно у важких режимах роботи електричних апаратів і в умовах підвищених вимог пожежо- і вибухобезпеки.

Проведені експериментальні дослідження основних електромагнітних процесів у гібридних контакторах з використанням лабораторного обладнання, що пройшло метрологічну перевірку. Дослідження процесів, що протікають в силових вентильно-тиристорних колах і колах керування гібридного контактора при його вмиканні й вимиканні, виконували на макеті, створеному на базі контактора КТ6013 і напівпровідникового блока серії БПК21, конструктивно змінених для зручності проведення експерименту.

При цьому для вимірювання струмів застосовували спеціальні безіндуктивні шунти і пояс Роговського, а для вимірювання рівня комутаційних перенапруг – спеціальні, розроблені здобувачем електронні схеми.

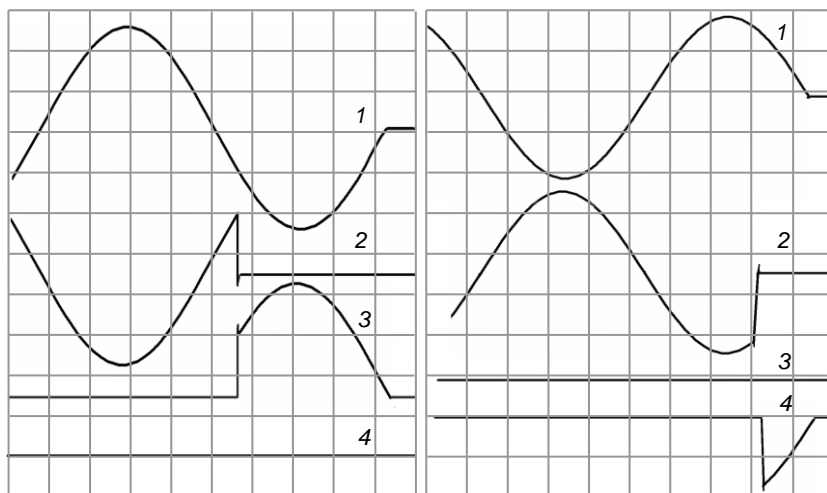


Рис. 11. Типові осцилограми струму при вимиканні контактора ( $I_n = 250$  А): 1 – струм навантаження; 2 – струм у ГК; 3 – струм у тиристорі VS1; 4 – струм в тиристорі VS2.

На рис. 11 наведені найбільш характерні з отриманих осцилограм, що відображають процес перетікання струму.

Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність отриманих в роботі теоретичних висновків з відносною похибкою 2 – 10 %, а також відповідність запропонованих технічних рішень вимогам, що до них ставляться.

## ВИСНОВКИ

У дисертації проведено теоретичне узагальнення і запропоновано вирішення науково-практичної задачі, що полягає в розробці на рівні винаходів технічних рішень з удосконалення гібридних контакторів низької напруги, а також у корегуванні науково обґрунтованих методик їх проектування. Отриманим результатом є суттєве покращення комутаційних, масогабаритних і вартісних характеристик гібридних контакторів низької напруги, що дозволяє створювати конкурентоспроможні зразки цих виробів. У процесі дослідження отримані наступні наукові й практичні результати:

1. Обґрунтовані в результаті системного аналізу існуючих гібридних контакторів такі принципи побудови: гібридні контактори змінного струму доцільно виконувати на базі силового гібридного ключа з двома зустрічно ввімкненими тиристорами, що розташовані в одному модулі, а постійного струму – на базі повністю керованого приладу (*IGBT*-ключа або двоопераційний тиристора); схема керування – безконтактна з керуванням від струму в колі головних контактів.

2. Встановлено, що при розімкненні головних контактів на стадії існування рідкого містка має місце перетікання струму в шунтуюче коло з напівпровідниковим ключем, що виконаний на базі сучасних силових напівпровідникових приладів.

3. Отримала подальшого розвитку модель процесу перетікання струму в шунтуюче коло, яка пояснює можливість повторних металевих замикань у колі головних контактів в результаті виникнення голок на поверхні контактів на шляху плям «короткої» дуги через велику швидкість спаду струму в її колі.

4. Встановлено, що при відключенні контактором аварійних струмів найбільш навантаженими будуть силові напівпровідникові прилади силових гібрид-



них ключів при використанні їх в однофазних схемах або в трифазних з нульовим проводом за наступних умов: силовий гібридний ключ розмикається в момент початку перехідного аварійного процесу, кут вмикання силового напівпровідникового приладу  $\alpha = 0$ , напруга фази  $U_{\delta} = 0$  і  $\cos \varphi_H = 0,3$ .

5. Удосконалення методик розрахунку температури структури силових напівпровідникових приладів при дії імпульсів струму довільної форми, яка на відміну від відомих дозволяє з більш високою точністю визначати цю температуру в умовах їхньої роботи у складі гібридних контакторів, а для виконання розрахунків за допомогою її достатньо мати інформацію тільки про параметри силових напівпровідникових приладів, що необхідні для розрахунку потужності втрат.

6. Розроблено на рівні винаходів (4 патенти України) три варіанти гібридних контакторів змінного струму і два варіанти контакторів постійного струму з покращеними характеристиками, а саме: у гібридних контакторах обох типів знижено рівень комутаційних перенапруг на 30 %; зменшено вартість, масу і габарити напівпровідникових блоків не менше ніж на 10 – 30 % залежно від варіанта і номінального струму; в контакторах змінного струму вдалося суттєво скоротити зону можливого дугоутворення і підвищити номінальний робочий струм контактора з  $0,6I_{\text{ном}}$  до  $0,8I_{\text{ном}}$ ; у контакторах постійного струму – підвищити надійність роботи за рахунок спрощення схеми керування напівпровідниковим ключем; є можливість застосовувати їх в реверсивних схемах.

7. Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджена експериментальними дослідженнями процесів, що протікають в силових колах і в колах керування гібридного контактора при його вмиканні й вимиканні в діапазоні струмів, що комутуються, 50 – 960 А.

8. Результати роботи впроваджені у виробництво на ЗАТ «ЕНАС» (м. Харків) і в навчальний процес на кафедрі електричного транспорту ХНАМГ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рак (Сабалаева) Н.О. Методика расчета теплового режима мощных управляемых полупроводниковых приборов силовых коммутационных аппаратов при длительном воздействии токовой нагрузки / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева), И.А. Соскова, П.Н. Алаев // Світлотехніка та електроенергетика. – 2006. – №7-8. – С.70-76. *Здобувачем проведено аналіз існуючих методик розрахунку теплового режиму силового ключа напівпровідникового апарата.*

2. Рак (Сабалаева) Н.О. Принципы построения гибридных контакторов переменного тока с улучшенными характеристиками / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева), И.А. Соскова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2007. – №25. – С. 106 – 114. *Здобувачем сформульовано основні принципи побудови гібридних контакторів змінного струму; запропоновано схему захисту напівпровідникового ключа від наскрізних струмів короткого замикання.*

3. Рак (Сабалаева) Н.О. Потери мощности в управляемых полупроводниковых приборах гибридных ключей / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева), И.А. Соскова // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1 (9). – С. 61-71. *Здобу-*

*вачем отримані аналітичні вирази для розрахунку втрат потужності в силових напівпровідникових приладах гібридних напівпровідникових ключів.*

4. Рак (Сабалаева) Н.О. Расчёт температурного поля силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в составе гибридных аппаратов / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева), И.А. Соскова // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – №3 – 4.– С. 39 – 50. *Здобувачем запропоновано методика розрахунку температури силових напівпровідникових приладів напівпровідникових ключів.*

5. Рак (Сабалаева) Н.О. Токовая нагрузка на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в нормальных режимах работы / Н.О. Рак (Сабалаева) // Коммунальное хозяйство городов: научно-технический сборник. – 2007. – Вып. 76.– С. 304–310.

6. Рак (Сабалаева) Н.О. Анализ токовой нагрузки на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в аварийных режимах работы / Н.О. Рак (Сабалаева) // Східноєвропейський журнал провідних технологій. – 2007. – №313 (27).– С. 15 – 18.

7. Рак (Сабалаева) Н.О. Анализ методов расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в коммутационных полупроводниковых аппаратах / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева), И.А. Соскова // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №1.– С. 85 – 88. *Здобувачем запропоновано інженерну методика розрахунку максимальної температури силових напівпровідникових приладів.*

8. Рак (Сабалаева) Н.О. Гибридный контактор постоянного тока с улучшенными технико-экономическими характеристиками / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева) // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2008. – №45.– С. 126 – 133. *Здобувачем проведено аналіз схем керування напівпровідниковим ключем гібридних контакторів постійного струму, запропоновано схему примусового запирання повністю керованого силового напівпровідникового приладу.*

9. Рак (Сабалаева) Н.О. Исследование токораспределения между главными контактами и шунтирующей цепью с полупроводниковым ключом при отключении тока гибридным контактором / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева) // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №4.– С. 85 – 89. *Здобувачем виконано кількісну оцінку впливу падінь напруги на рідкому металевому містку і «короткій» дузі на процес перетікання струму з кола головних контактів у коло напівпровідникового ключа.*

10. Рак (Сабалаева) Н.О. Расчёт коммутационных перенапряжений в гибридных контакторах постоянного тока и способы их ограничения / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева) // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №4.– С. 38 – 42. *Здобувачем запропоновано послідовно-паралельне з'єднання варісторів для підвищення допустимої енергії обмежувача перенапруг.*

11. Рак (Сабалаева) Н.О. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутации цепей переменного тока гибридными контакторами / А.Г. Сосков, Н.О. Сабалаева, И.А. Соскова // Світлотехніка та електроенергетика. – 2009. – №1. – С. 77 – 90. *Здобувачем запропоновано методика розрахунку комутаційних перенапруг, що прикладаються до силових напівпровідникових приладів гібридних контакторів змінного струму, яка враховує динамічні характеристики силових напівпровідникових приладів і умови комутації навантаження.*

12. Сабалаєва Н.О. Сучасний стан і тенденції розвитку керованих силових напівпровідникових приладів і його вплив на розвиток комутаційних напівпровідникових апаратів / А.Г. Сосков, Ю.П. Колонтаєвський, Я.Б. Форкун, Н.О. Сабалаєва, І.О. Соскова // Світлотехніка та електроенергетика. – 2009. – №2 (18). – С. 60 – 67. *Здобувачем виконаний докладний аналіз та визначені основні етапи розвитку силових напівпровідникових ключів.*

13. Сабалаєва Н.О. Применение варисторов для защиты полупроводникового ключа гибридных контакторов переменного тока от коммутационных перенапряжений / А.Г. Сосков, Н.О. Сабалаєва // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2009. – №7. – С.139 – 145. *Здобувачем запропоновано і обґрунтовано застосування варистора із захисним RC-колом для гібридних контакторів змінного струму; виконано розрахунок параметрів такого захисного кола.*

14. Пат. 22023 Україна, МПК<sup>8</sup> Н 01 Н 9/30, Н 01 Н 9/54. Гібридний контактор змінного струму / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаєва), І.О. Соскова; заявник та патентовласник Харківська національна академія міського господарства, Українська інженерно-педагогічна академія. – № u2006 11929; заявл. 13.11.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. *Здобувачем запропоновано ввести додатковий транзисторний ключ, вихідне коло якого підключене до виходу випрямного моста.*

15. Пат. 24209 Україна, МПК<sup>8</sup> Н 01 Н 9/30, Н 01 Н 9/54. Гібридний контактор змінного струму / А.Г. Сосков, Я.Б. Форкун, Н.О. Рак (Сабалаєва), І.О. Соскова; заявник та патентовласник Харківська національна академія міського господарства, Українська інженерно-педагогічна академія. – № u2007 00596; заявл. 22.01.2007; опубл. 25.06.2007, Бюл. № 9. *Здобувачем запропоновано пристрій, що забезпечує невмикання НК при протіканні в головному колі наскрізних струмів короткого замикання.*

16. Пат. 30660 Україна, МПК<sup>8</sup> Н 01 Н 9/30, Н 01 Н 9/54. Гібридний комутаційний апарат змінного струму / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаєва), О.Ю. Поліщук; заявник та патентовласник Харківська національна академія міського господарства. – № u2007 10952; заявл. 03.10.2007; опубл. 11.03.2008, Бюл. № 5. *Здобувачем запропоновано схему включення магніторезистивних датчиків струму, введення у блок живлення обмежувального конденсатора.*

17. Пат. 33171 Україна, МПК<sup>8</sup> Н 01 Н 9/30, Н 01 Н 9/54. Гібридний двополюсний контактор постійного струму / А.Г. Сосков, Н.О. Сабалаєва, І.О. Соскова; заявник та патентовласник Харківська національна академія міського господарства, Українська інженерно-педагогічна академія. – № u2008 01870; заявл. 13.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. №11. *Здобувачем запропоновано схему запирання повністю керованого силового напівпровідникового прилад, схему захисту від комутаційних перенапруг.*

18. Рак (Сабалаєва) Н.О. Токовая нагрузка на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаєва) // Новейшие технологии и энергоэффективность в светотехнике и электроэнергетике. Междунар. науч.-техн. конф., 16 – 18 апреля 2007 г.: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Харьков, 2007. – С. 93-98. *Здобувачем наведено аналітичні вирази для струмів тиристорів трифазних напівпровідникових ключів гібридних контакторів при різних кутах їх включення.*

19. Рак (Сабалаева) Н.О. Гибридные контакторы постоянного тока, выполненные на базе полностью управляемых полупроводниковых приборов / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева) // Новейшие технологии в электроэнергетике. Междунар. науч.-техн. конф., 17 – 19 марта 2008 г.: материалы конференции. – Харьков, 2008. – С. 37 – 39. *Здобувачем запропоновано схему примусового запирання повністю керованого силового напівпровідникового приладу.*

20. Рак (Сабалаева) Н.О. Гибридный контактор переменного тока, управляемый коммутируемым током / А.Г. Сосков, Н.О. Рак (Сабалаева) // XXXIV научно-техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства, 12 – 14 мая 2008 г.: сб. тезисов докладов науч.-техн. конф. – Харьков, 2008. – С. 72 – 73. *Здобувачем запропонований пристрій, що забезпечує невмикання напівпровідникового ключа при протіканні в головному колі наскрізних струмів короткого замикання.*

21. Сабалаева Н.О. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутировании цепей переменного тока гибридными контакторами / А.Г. Сосков, Н.О. Сабалаева, И.А. Соскова // Новейшие технологии в электроэнергетике. Международная научно-техническая интернет-конф., 1 – 27 марта 2009 г.: сб. тезисов докладов. – Харьков, 2009. – С. 28. *Здобувачем проведено аналіз існуючих методик розрахунку комутаційних перенапруг, що прикладаються до напівпровідникових ключів гібридних контакторів змінного струму.*

## АНОТАЦІЇ

**Сабалаєва Н.О. Обґрунтування шляхів покращення комутаційних і масогабаритних характеристик гібридних контакторів низької напруги.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – Електричні машини й апарати. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2010.

В дисертації розв'язано науково-практичну задачу, яка полягає у розробці принципово нових технічних рішень з удосконалення гібридних контакторів низької напруги, а також у створенні науково обґрунтованих методик їх проектування. Цю задачу розв'язано шляхом розробки основних принципів побудови цих апаратів, виконаної на основі аналізу існуючих конструкцій з урахуванням сучасних досягнень в силовій електроніці, а також шляхом поглибленого аналізу нестационарних електромагнітних і теплових процесів, що мають місце в силових колах контакторів при комутації навантаження. В результаті розроблені на рівні винаходів кілька варіантів принципових електричних схем гібридних контакторів змінного і постійного струму, що дозволять створювати конкурентоспроможні зразки цих виробів із суттєво покращеними комутаційними і масогабаритними характеристиками, а також створені удосконалені методики їх розрахунку, що підвищують якість їх проектування.

Ключові слова: електричний апарат, гібридний контактор, нестационарні електромагнітні процеси, теплові процеси, комутаційні і масогабаритні характеристики, комутація електричного кола.

**Сабалаева Н.О. Обоснование путей улучшения коммутационных и массогабаритных характеристик гибридных контакторов низкого напряжения.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

В диссертационной работе представлено новое решение научно-практической задачи, которое состоит в разработке принципиально новых технических решений по усовершенствованию гибридных контакторов низкого напряжения, а также в усовершенствовании научно обоснованных методик их проектирования. Полученным результатом является существенное улучшение технико-экономических характеристик гибридных контакторов переменного и постоянного тока, позволяющее создавать конкурентоспособные образцы этих изделий. Ниже представлены основные идеи, результаты и выводы диссертации.

В результате системного анализа существующих гибридных контакторов обоснованы следующие принципы построения: гибридные контакторы переменного тока целесообразно выполнять на базе полупроводниковых ключей (ПК) с двумя встречно включенными тиристорами, а постоянного тока – на базе ПК с полностью управляемым прибором, при этом схему управления этих ПК предпочтительно выполнять бесконтактной с управлением от тока цепи главных контактов (ГК).

В результате расширенных исследований нестационарных электромагнитных и тепловых процессов в силовых цепях гибридных контакторов получены следующие результаты:

- установлено, что при размыкании ГК имеет место перетекание тока в шунтирующую цепь с ПК, выполненным на базе современных силовых полупроводниковых приборов (СПП), ещё на стадии существования жидкого мостика, т.е. до возникновения «короткой» дуги;

- получила дальнейшее развитие модель процесса перетекания тока в шунтирующую цепь, поясняющая возможность повторных замыканий в цепи ГК в результате возникновения игл на поверхности контактов по ходу пятен «короткой» дуги из-за большой скорости спада тока в её цепи. При этом показано, что этот процесс носит случайный характер;

- установлено, что при отключении контактором аварийных токов наиболее нагруженными будут СПП силового ПК в однофазных схемах или в трёхфазных с нулевым проводом при условии, что ключ размыкается в момент начала переходного процесса, угол включения СПП  $\alpha = 0$ , напряжение фазы  $U_{\phi} = 0$ ;

- усовершенствована методика расчёта температуры структуры СПП при воздействии импульсов тока произвольной формы, которая позволяет с высокой точностью определять эту температуру, а для расчётов с её помощью достаточно иметь информацию только о параметрах СПП, требуемой для расчёта мощности потерь.

- усовершенствованы методики расчёта воздействия токовой нагрузки и коммутационных перенапряжений на СПП а также номинального рабочего тока.

Разработаны на уровне изобретений варианты принципиальных электрических схем гибридных контакторов переменного и постоянного тока, позволяющих создавать контакторы с существенно улучшенными характеристиками. Это позволило в гибридных контакторах переменного тока существенно сократить зону возможного дугообразования; повысить номинальный рабочий ток с  $0,6I_{\text{ном}}$  до  $0,8I_{\text{ном}}$ , понизить уровень коммутационных перенапряжений на 30 %, уменьшить стоимость, массу и габариты полупроводниковых блоков на 10 – 20 %; в гибридных контакторах постоянного тока существенно снизить массу, габариты и стоимость полупроводникового блока до уровня контакторов переменного тока; повысить надёжность работы за счёт упрощения схемы управления ПК, существенно снизить уровень коммутационных перенапряжений (менее  $2,5U_{\text{н}}$ ).

Достоверность полученных в работе результатов подтверждены экспериментальными исследованиями процессов, протекающих в силовых цепях и в цепях управления гибридного контактора при его включении и отключении в диапазоне коммутируемых токов 50 – 960 А. Внедрение в производство разработанных гибридных контакторов подтверждено соответствующими актами.

Ключевые слова: электрический аппарат, гибридный контактор, нестационарные электромагнитные процессы, тепловые процессы, коммутационные и массогабаритные характеристики, коммутация электрической цепи.

**Sabalaeva N.O. Ground of Ways of Improvement of Commutations and Mass-sizes Descriptions of Hybrid Contactors of Low Voltage. – Manuscript.**

The thesis for competition of scientific degree of candidate technical science on speciality 05.09.01 – Electric Machines and Apparatus. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2010.

In the thesis the questions of development of new engineering solution which directed on improvement of hybrid contactors of low voltage and establishing of science-based methods of their engineering have been treated. This aim has succeeded by definition of main principles of construction this apparatus, which has been solved on base analysis of present constructions taking into account contemporary advances in field of power electronics and with the help of deep analysis of non-steady electromagnetic and heat processes in power circuits of contactors under commutation of loading. As a result several variations of electrical schematics of hybrid contactors alternative and direct current have been developed on level of invention. This allowing to develop competitive models of this apparatus with improved switching and mass dimensions characteristics, also creation improved methods of their calculations to upgrade of their engineering.

Key words: electric apparatus, hybrid contactor, non-steady electromagnetic processes, heat processes, switching and mass dimensions characteristics, commutation of electric circuit.

Підп. до друку 15.03.2010      Формат 60x84 1/16      Папір офісний  
Друк на ризографі      Умовн.- друк. арк. 0,9.      Обл.-вид.арк. 1,0 Замовл.  
№ 5650      Тираж 100 прим.      Безкоштовно

---

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК №731 від 19.12.2001