

4. Pineau, D. Performance analysis of heating systems for low energy houses [Text] / D. Pineau, P. Rivière, P. Stabat, P. Hoanga, V. Archambault // Energy and Buildings. – 2013. – Vol. 65. – P. 45–54. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.05.036
5. Xu, J. A novel service recovery method based on Bellman dynamic programming [Text] / J. Xu, H. Wang, G. Feng, H. Lü, S. Tian // Journal of Harbin Engineering University. – 2011. – Vol. 32, Issue 6. – P. 807–813. doi: 10.1109/ICCIA.2010.6141550
6. Sayyaadi, H. Multi-objective optimization of a vertical ground source heat pump using evolutionary algorithm [Text] / H. Sayyaadi, E. H. Amlashi, M. Amidpour // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50, Issue 8. – P. 2035–2046. doi: 10.1016/j.enconman.2009.04.006
7. Kralj, A. K. The usage of waste hydrogen from outlet gas as a fuel in different fuel cells [Text] / A. K. Kralj // Energy. – 2010. – Vol. 35, Issue 3. – P. 1433–1438. doi: 10.1016/j.energy.2009.11.028
8. Hsua, C.-K. Reduction of energy consumption and pollution emissions for industrial furnace using hydrogen-rich tail gas [Text] / C.-K. Hsua, C.-L. Leeb, C.-H. Wang, C.-J. G. Jou // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, Issue 18. – P. 9675–9680. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.195
9. Профос, П. Регулирование паросиловых установок [Текст] / П. Профос. – М.: Энергия, 1967. – 368 с.
10. Давыдов, В. О. Сравнительный анализ метода генетического алгоритма и динамического программирования на примере решения задачи управления системой с переменной структурой [Текст] / В. О. Давыдов, О. Б. Максимова, Т. С. Добровольская // Журнал «Холодильная техника и технология». – 2013. – 5(145). – С. 77–81.

У статті виконані дослідження температурного поля силових напівпровідникових приладів при дії струмового імпульсу довільної форми на основі моделі, що адекватно відтворює їх конструкцію; розроблена інженерна методика розрахунку, що дозволяє правильно розраховувати тепловий режим роботи напівпровідникових приладів у складі напівпровідникових апаратів і раціонально вибирати їх тип; наведені приклади розрахунку

Ключові слова: перевищення температури, струмове навантаження, теплофізична модель, напівпровідниковий ключ, напівпровідниковий апарат

В статье выполнены исследования температурного поля силовых полупроводниковых приборов при воздействии токового импульса произвольной формы, на основе модели, адекватно отражающей их конструкцию; разработана инженерная методика расчёта, позволяющая правильно рассчитывать тепловой режим работы полупроводниковых приборов в составе полупроводниковых аппаратов и рационально выбирать их тип; приведены примеры расчёта

Ключевые слова: превышение температуры, токовая нагрузка, теплофизическая модель, полупроводниковый ключ, полупроводниковый аппарат

1. Вступ

Дане дослідження належить до електротехніки, зокрема до галузі комутаційних напівпровідникових апаратів низької напруги [1].

УДК 621.316

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27983

РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ РОБОТИ У СКЛАДІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ АПАРАТІВ

А. Г. Сосков

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*
ansoskov@gmail.com

М. Л. Глєбова

Кандидат технічних наук, доцент*
toe@kname.edu.ua

Н. О. Сабалаєва

Кандидат технічних наук, доцент*
natalysub@mail.ru

Я. Б. Форкун

Кандидат технічних наук, доцент*
jana_forkun@mail.ru

*Кафедра теоретичної та загальної електротехніки
Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова
вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

В комутаційних напівпровідникових апаратах (НА) як гібридних [2], так і безконтактних [3] силові напівпровідникові прилади (СНП) входять до складу напівпровідникових ключів (НК), що забезпечують бездугову комутацію потоків електричної потужності,

тобто надійно виконують основну силову функцію комутаційного апарата [4]. Як СНП у вказаних ключах застосовуються одноопераційні прилади (тиристри, симістри, оптронні тиристри) або двоопераційні прилади (IGBT-транзистори, GTO-тиристри, IGBT-тиристри).

Найважливішим фактором, що визначає надійність цього основного вузла комутаційного НА, є тепловий режим напівпровідникових ключів [5]. Основним параметром, що характеризує цей режим, є температура напівпровідникової структури СНП, що залежить від характеру потужності, що підводиться, та його конструкції. Тому розрахунок значень цієї температури при заданих умовах роботи є однією з першочергових задач, що виникають при розробці й проектуванні комутаційних НА. Розрахунок теплового режиму СНП, застосованого в НА, помітно ускладнюється внаслідок специфічної форми імпульсів потужності, що розсіюється в напівпровідниковій структурі [4], й нестационарного характеру теплофізичних процесів, що мають місце в СНП [3].

В [3] показано, що основним режимом СНП, що працюють у складі НА є імпульсний режим. У цьому режимі вони працюють в гібридних НК змінного і постійного струмів, а також в безконтактних апаратах змінного і постійного струму при аварійних режимах у колі навантаження. При цьому форма струмового імпульсу може бути довільною за тривалістю до 0,02 с., тобто цей режим широко розповсюджений в НА і потребує детального аналізу. Розрахунок же температури напівпровідникової структури СНП у складі НА в тривалому режимі проаналізовано авторами в [1, 3].

Для раціонального вибору СНП як елемента напівпровідникового ключа розробникам комутаційних напівпровідникових апаратів необхідно враховувати граничні параметри СНП. Система гранично допустимих параметрів ключа поєднує граничні значення напруг і струмів для вхідного й вихідного кіл напівпровідникового приладу, а також максимально можливу потужність, що розсіюється, і гранично допустимі температури переходів і корпусу. Останні визначаються властивостями вихідного матеріалу, особливостями структури переходів і конструкції приладу, а також режимом його роботи і є найбільш значущими, оскільки в основному визначають габарити і вартість напівпровідникового ключа. Тому розрахунок значень цих потужностей і температур при заданих умовах роботи є однією з найважливіших задач, які виникають при розробці й проектуванні комутаційних напівпровідникових апаратів.

2. Літературний огляд

В науковій та технічній літературі значної уваги приділено тепловим процесам, що мають місце в напівпровідниковій структурі СНП, адже від характеру розподілу тепла вздовж такої структури значною мірою залежить надійність його роботи, а також на основі розрахунку температурного поля СНП виконується вбір того чи іншого його типу для роботи у конкретному напівпровідниковому апараті (безконтактному або гібридному) [1, 3].

Існує два основних методи визначення температури структури СНП: графоаналітичний і аналітичний [1]. Для розрахунку температури СНП в імпульсному режимі зараз найбільшого розповсюдження одержав перший метод, який заснований на застосуванні графічної залежності перехідного теплового опору приладу від часу [3, 6]. В [3] розглянуті особливості, які властиві цьому методу, а також основні правила його застосування. Даний метод дозволяє достатньо просто визначати температуру напівпровідникової структури (надалі структури) СНП при дії на них одиничних імпульсів потужності довільної форми. Проте, у зв'язку зі складністю одержання значення перехідного теплового опору в діапазоні малих часів (менше 0,01 с) для СНП в довідкових матеріалах або взагалі не наводиться, або якщо і наводиться, то ця інформація не відрізняється необхідною достовірністю [1].

Аналітичний метод розрахунку теплових характеристик (температури структури) СНП, базується на розв'язанні рівнянь нестационарної теплопровідності, складених для внутрішніх елементів конструкції з урахуванням їхнього взаємозв'язку, геометричних розмірів і характеристик застосованих матеріалів [7]. В загальному випадку нестационарні теплові процеси багатопарових систем, якими є наприклад, СНП, описуються системою нелінійних рівнянь в часткових похідних з неоднорідними граничними й початковими умовами [8].

Оскільки аналітично системи рівнянь, як правило, безпосередньо нерозв'язні, розв'язок їх виконується на базі спрощених теплофізичних моделей [4]. Однак, при тривалості струмового імпульсу від 0,01 до 0,02 с. цей метод також не забезпечує потрібної точності [3, 4].

Проте, враховуючи високий рівень розвитку сучасної обчислювальної техніки, а також широкий вибір стандартних програм для вирішення навіть складних математичних задач, саме аналітичний метод починає широко застосовуватись розробниками при визначенні температури структури СНП при імпульсній дії навантаження, оскільки розрахунок за цим методом повною мірою враховує всі без винятку шари СНП і дозволяє з високою точністю одержувати значення температури структури СНП у будь-якій її точці.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження обрано дослідження нестационарних теплових процесів у силових напівпровідникових приладах напівпровідникових ключів гібридних та безконтактних НА, у тому числі з урахуванням ймовірнісного характеру струмового навантаження на ці прилади, внести уточнення до інженерної методики розрахунку теплового режиму силових напівпровідникових приладів в умовах їхньої роботи у складі вказаних апаратів.

Серед задач, вирішення яких необхідно для досягнення поставленої мети, є:

- дослідження температурного поля напівпровідникових ключів при дії імпульсів струму довільної форми на базі теплової моделі, що адекватно відтворює структуру СНП, шляхом чисельного розв'язання рівнянь теплопровідності;

- розробка уточненої інженерної методики розрахунку теплового режиму СНП в умовах їхньої роботи в гібридних і безконтактних НА, в якій використовуються тільки параметри СНП (R_d, U_0, R_{thj}), що завжди наведені в довідниковій літературі;
- наведення прикладів розрахунку теплового режиму СНП для найбільш розповсюджених умов роботи НА.

4. Дослідження температурного поля напівпровідникових ключів при дії імпульсів струму довільної форми

Аналіз конструкції СНП показує, що в першому, найзагальнішому наближенні теплофізична модель цього приладу може бути наведена у вигляді багатошарової системи різношарових пластин з внутрішнім джерелом тепла, розташованого в напівпровідниковій структурі. Основним елементом цієї моделі є монокристалічна пластина з напівпровіднику (як правило, кремнію), де методом дифузії утворені декілька електронно-діркових переходів, що створюють напівпровідникову структуру. Ця пластина разом з термокомпенсаторами називається випрямним елементом, за конструкцією якого сучасні СНП поділяються на дві групи: прилади з припаяними контактами (наприклад, потужні тиристри з гнучким або жорстким виводом) і прилади з притискними контактами (наприклад, потужні тиристри таблеткового типу). У першій групі приладів (рис. 1, а) контакт між напівпровідниковою пластиною і вольфрамовим термокомпенсатором забезпечується методом паяння, у другій (рис. 1, б) припаюється тільки нижній термокомпенсатор, контакт же між пластиною і верхньою мідною основою створюється за допомогою постійного механічного натиснення, яке забезпечується конструкцією приладу кризь м'яку струмопровідну прокладку.

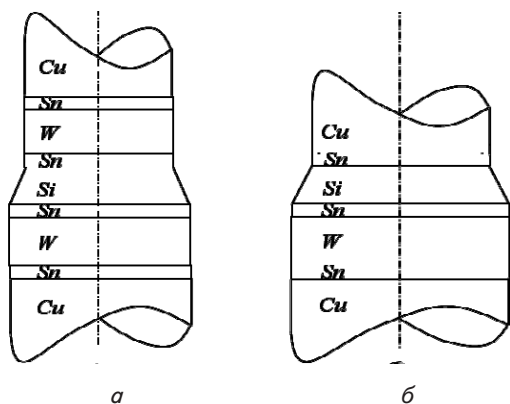


Рис. 1. Варіанти конструкції потужних тиристорів: а – з припаяними контактами; б – з притискними контактами

У зв'язку з цим прилади з притискними контактами є більш стійкими до дії температурних циклів і в них кращі умови відведення тепла від напівпровідникової пластини, тому СНП, розраховані на струми понад 250 А виконуються тільки таблеткового типу [3].

4.1. Аналітичний метод розрахунку теплового поля, що виконується на базі моделі, яка адекватно відтворює конструкцію силових напівпровідникових приладів

Враховуючи рівень розвитку сучасної обчислювальної техніки стає можливим побудувати дану методику на основі чисельного розв'язку рівнянь теплопровідності для реальної конструкції СНП, де вже враховані абсолютно всі без виключення шари СНП.

Метою даного дослідження є розробка на підґрунті цього методу інженерної методики розрахунку температури структури СНП при дії на неї імпульсів струму довільної форми і тривалістю до 0,02 с, за допомогою якої стає можливим з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначати кількісні параметри температурного поля, тобто визначати перевищення температури в будь-якому місці структури СНП в довільний момент дії імпульсу потужності. На відміну від методики розрахунку температури структури СНП, заснованої на використанні спрощених теплофізичних моделей СНП [1, 3, 4], запропонована методика дозволить з більш високою точністю виконувати розрахунок перевищення температури структури СНП.

На рис. 2, а, б наведені теплофізичні моделі тиристорів з припаяними і притискними контактами відповідно.

При виконанні розрахунку температурного поля СНП були прийняті такі допущення [4]:

- градієнт температури у площині, перпендикулярній вісі приладу, дорівнює нулю, тому задача розв'язується в одновимірному наближенні;
- вся енергія втрат виділяється в об'ємі напівпровідникової структури (у всьому або деякій його частині), тобто розглядається випадок з об'ємним джерелом тепла;
- початкова температура всіх елементів моделі однакова;
- вольт-амперна характеристика СНП в прямому напрямку апроксимується граничною напругою U_0 і лінійною залежністю від струму при $u > U_0$, яка визначається диференціальним опором R_d .

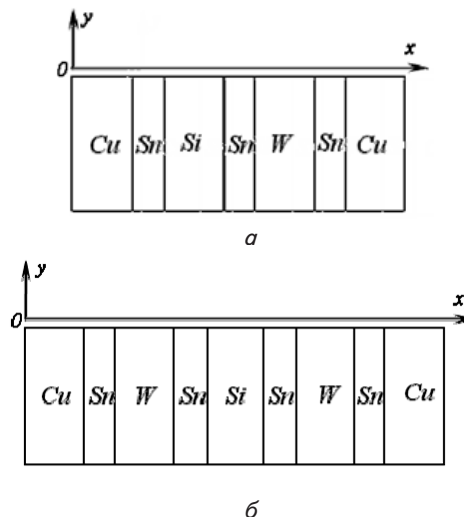


Рис. 2. Теплофізичні моделі потужних тиристорів: а – з припаяними контактами; б – з притискними контактами

Обґрунтування вищезазначених допущень наведено в [1, 3, 4].

Розподіл перевищення температури в шарах розрахункових моделей при одновимірному розповсюдженні тепла визначається наступними системами диференціальних рівнянь в часткових похідних другого порядку (1 і 2) [9, 10].

Передбачається, що джерело тепла рівномірно розподілене за об'ємом кремнієвої пластини) [1].

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = a_1(\theta) \frac{d^2\theta_1}{dx^2}, \\ \dots \\ \frac{d\theta_4}{dt} = a_4(\theta) \frac{d^2\theta_4}{dx^2}, \\ \frac{d\theta_3}{dt} = a_5(\theta) \frac{d^2\theta_3}{dx^2} + \frac{q}{c_3\gamma_3}, \\ \frac{d\theta_6}{dt} = a_6(\theta) \frac{d^2\theta_6}{dx^2}, \\ \dots \\ \frac{d\theta_9}{dt} = a_9(\theta) \frac{d^2\theta_9}{dx^2}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = a_1(\theta) \frac{d^2\theta_1}{dx^2}, \\ \frac{d\theta_2}{dt} = a_2(\theta) \frac{d^2\theta_2}{dx^2}, \\ \frac{d\theta_3}{dt} = a_3(\theta) \frac{d^2\theta_3}{dx^2} + \frac{q}{c_3\gamma_3}, \\ \frac{d\theta_4}{dt} = a_4(\theta) \frac{d^2\theta_4}{dx^2}, \\ \dots \\ \frac{d\theta_7}{dt} = a_7(\theta) \frac{d^2\theta_7}{dx^2}. \end{cases}$$

Для системи (1), складеної для моделі тиристора з припаяними контактами, змінні з індексом 1 та 9 – для міді, з індексом 2, 4, 6 та 8 – для припою, 3 та 7 – для вольфраму, 4 – для кремнієвої пластини; для системи (2), складеної для моделі тиристора з притискними контактами, змінні з індексом 1 та 7 – для міді, з індексом 2, 4 та 6 – для припою, 3 – для кремнієвої пластини, 5 – для вольфраму; θ_i – перевищення температури;

$q = \frac{P(t)}{V}$ – питома потужність, яка виділяється в кремнієвій пластині; V – об'єм кремнієвої пластини;

$a_i(\theta) = \frac{\lambda_i(\theta)}{c_i(\theta)\gamma_i}$ – коефіцієнт температуропровідності;

$c_i(\theta)$ – питома теплоємність; γ_i – питома густина; $\lambda_i(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності, де для цього випадку $i=1..9$ для (1) і $i=1..7$ для (2).

Системи рівнянь теплопровідності вигляду (1) і (2) можуть бути розв'язані методом кінцевих різниць із застосуванням тієї або іншої різницевої схеми (явної або неявної), під якою розуміють сукупність різницевих рівнянь, що апроксимують основне рівняння, і додаткових умов початкової диференціальної задачі [11].

Вибір цієї схеми проводиться виходячи з міркувань стійкості, яка визначає чутливість різницевої схеми до різного роду похибок. Дослідження стійкості різницевої схеми при апроксимації рівнянь теплопровідності [12] показують доцільність застосування неявної схеми, яка на відміну від явної є абсолютно стійкою, тобто вибір величини часового і просторового кроків визначається тільки заданою точністю розрахунків, а не міркуваннями стійкості.

Незважаючи на дуже велику кількість математичних операцій, що виконані при розрахунку цим методом, яке прямо пропорційне величинам просторового і часового кроків, він достатньо легко реалізується за допомогою ЕОМ, є зручним і забезпечує високу точність розрахунків. Такі математичні засоби, як Mathcad, Maple та ін. дозволяють скласти достатньо компактною програму, в якій реалізується наведений вище алгоритм, проводити розрахунки з високою точністю і малими витратами часу, а також виводити на екран тривимірні графіки розповсюдження тепла в структурі СНП з часом при дії на нього синусоїдного імпульсу струму (рис. 3).

Слід зазначити, що при розрахунках теплових процесів у найбільш розповсюджених типах тиристорів описаним методом був вибраний розподіл часової шкали на 100 рівномірних відрізків виходячи з того, що збільшення і зменшення цієї кількості в 10 разів не впливає на точність результату. Також був досліджений вплив зміни товщини просторових шарів, на які розбивалася модель СНП. За основу були взяті такі дані: кількість елементарних шарів кремнію – 10, з обох боків від нього вольфраму – 15, припою – 2, мідь – 15. Збільшення, як і зменшення кількості розбиття на елементарні шари кожного матеріалу в 2–10 разів також дуже незначною мірою вплинуло на кінцевий результат (відносна похибка складала менше 0,3%). Таким чином, значне зменшення просторового і часового кроків (більш десятиразового) веде не стільки до збільшення точності, скільки до невиправданого збільшення часу розрахунків на ЕОМ.

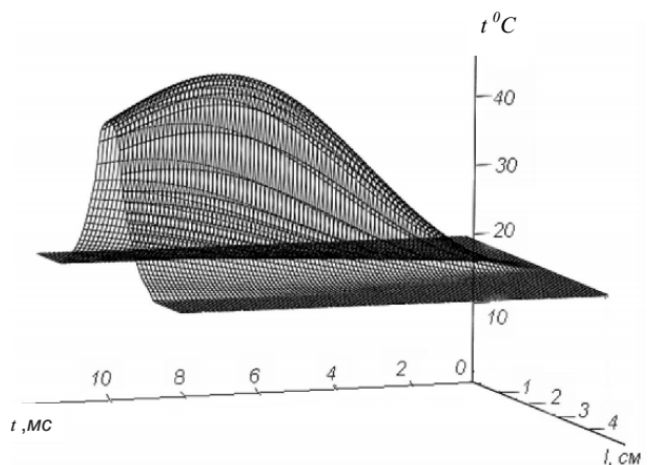


Рис. 3. Розподіл перевищення температури в структурі тиристора Т161-160 при дії синусоїдного імпульсу струму 1400 А

Крім того, було досліджено вплив розбиття на більшу кількість елементарних шарів тільки кремнієвої

пластини й умовне знаходження об'ємного джерела тепла в одному центральному шарі, в трьох центральних і у всіх шарах кремнію. Таке дослідження було проведено у зв'язку з тим, що температура в кремнії з часом змінюється найбільш інтенсивно в порівнянні з іншими шарами тиристора, а також виходячи з фізичної будови *p-n* структури, в якій в реальності виділяється тепло. Проведений аналіз показав, що дрібне розбиття кремнію і розташування джерела тепла в одному, кількох або у всіх шарах кремнію різною мірою позначаються на результаті розрахунку перевищення температури. При цьому результати максимального перевищення температури при дії синусоїдального імпульсу струму відрізняються приблизно на 2 % при розташуванні джерела тепла в центр кремнію в порівнянні із займаним ним повним об'ємом (при однаковій загальній кількості шарів кремнію), значення ж перевищення температури в кінці імпульсу відрізняються трохи (менше 0,1 %). При однаковому розташуванні джерела тепла (в центрі або по всьому об'єму кремнію), але при різному подрібненні на шари кремнієвої пластини різниця в значеннях θ є зовсім незначною.

4. 2. Інженерна методика розрахунку перевищення температури структури силових напівпровідникових приладів

У зв'язку з тим, що при розрахунках перевищення температури за допомогою розглянутого вище методу необхідно вводити інформацію, що характеризує конструкцію конкретного типу СНП, якою не володіють розробники комутаційних НА, в роботі пропонується вдосконалена методика розрахунку температури структури, позбавлена вказаних недоліків.

Суть її полягає в наступному.

1) Вираз для перехідного теплового опору $r(t)$ представляється для конкретного типу СНП у вигляді ряду експонент типу [1, 3, 4, 6]:

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

Для цього залежність $\theta(t)$ для шару кремнію, яка розрахована при дії на СНП прямокутного імпульсу одиничної потужності і яка чисельно дорівнює перехідному теплового опору перехід-корпус [4], апроксимується у вигляді функції типу (3), що дозволяє отримати значення коефіцієнтів R_i і τ_i (проведені дослідження показали, що вже при $n=2$ похибка апроксимації менше 0,5 %).

У табл. 1 наведені значення R_i і τ_i для найбільш поширених потужних тиристорів виробництва ВАТ «Електровипрямляч» (Росія).

Таблиця 1

Параметри, які характеризують перехідний тепловий опір тиристорів

Тип тиристора	Конструкція контактів	$R_1, \frac{^{\circ}C}{Вт}$	$\tau_1, мс$	$R_2, \frac{^{\circ}C}{Вт}$	$\tau_2, мс$
T151-100	припаяні	0,0193	20,47	0,0038	1,82
T161-160	припаяні	0,0193	20,47	0,0038	1,82
T171-250	припаяні	0,0145	20,45	0,0028	1,82
T143-400	притискні	0,0049	19,03	0,0017	1,62
T143-630	притискні	0,0049	19,03	0,0017	1,62

2) Для розрахунку перевищення температури структури СНП при дії імпульсної потужності довільної форми $P(t)$ використовується аналітична формула Дюамеля (інтеграл Дюамеля) [4].

$$\theta = \int_0^t P(t-\tau) \frac{\partial r(\tau)}{\partial \tau} d\tau + P(t)r(0),$$

де $r(t)$ – перехідний тепловий опір; $P(t)$ – імпульс потужності; $r(0)$ – перехідний тепловий опір при $t = 0$.

В наведеному випадку $r(0) = 0$.

Обчислення інтегралів доцільно проводити в середовищі Mathcad. При цьому є можливість одержати значення перевищення температури не тільки в кінці імпульсу струму, але і у будь-який момент його дії. Програма розрахунку наведена у [4].

Аналіз даних, одержаних при розрахунку перехідного теплового опору $r(t)$ за допомогою даної методики, показує, що його величина для кожного типу тиристорів дещо перевищує величину цього опору, що визначається за допомогою спрощених теплофізичних моделей [4].

При розрахунку перехідного теплового опору для конструкції тиристорів з припаяними контактами різниця в його величині досягає 16 %. При його розрахунку для тиристорів з притискними контактами різниця у величині цього опору складає близько 5 %. Таким чином, можна зробити висновки про те, що розрахунок перевищення температури структури СНП доцільніше проводити з використанням пропонованої методики, яка дозволяє з більш високою точністю проводити розрахунок перехідного теплового опору, оскільки при цьому розрахунку враховуються всі складові структури СНП, на відміну від методики з використанням спрощених теплових моделей; при цьому також враховується залежність фізичних характеристик матеріалів складових тиристора від змін їх температури.

5. Приклад використання інженерної методики розрахунку перевищення температури структури силових напівпровідникових приладів

Як приклад використання даної методики нижче наведений розрахунок номінальних робочих струмів при роботі гібридних контакторів в трифазному колі.

Вираз для струму при виникненні аварійного режиму в несприятливий момент часу має наступний вигляд [4]:

$$i(t, I_m) = I_m [\sin(\omega t - \phi_K) + e^{-\frac{t}{\tau_K}} \sin \phi_K], \tag{4}$$

де I_m – амплітуда фазного струму аварійного режиму (у подальшому $I_{m,доп}$ – амплітуда гранично допустимого струму); ϕ_K – кут зсуву фази навантаження в колі короткого замикання, що знаходиться з [4]:

$$\sin(\omega t - \phi_K) + e^{-\frac{\omega t}{\tau_K}} \sin \phi_K = 0,$$

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота; $\tau_K = \frac{L_K}{R_K}$ – постійна часу в

колі короткого замикання; ϕ_K – кут зсуву фази навантаження в колі короткого замикання.

Будемо вважати, що температура навколишнього середовища $T_{навк} = 40^\circ\text{C}$. Використовуючи дані табл. 1 складається аналітичний вираз для перехідного теплового опору $r(t)$, а з допомогою (4) складається вираз для нагріву тиристора $\theta_{а.р.}$ при відключенні струму аварійного режиму як функції струму і часу.

$$\theta_{а.р.}(t, I_{мп.доп}) = \int_0^t i(t-\tau, I_{мп.доп}) \cdot [U_0 + i(t-\tau, I_{мп.доп}) \cdot R_d] \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} r(\tau) d\tau \quad (5)$$

Слід зазначити, що контактор часто вимикає аварійні струми вже заздалегідь працюючи в сталому режимі (середня частота вмикань $n_0 = 600 \frac{\text{ВКЛ}}{\text{час}}$ або $n_0 = 0,167 \frac{\text{ВКЛ}}{\text{с}}$, період струму, що вимикається $T = 0,02 \text{с}$), що також викликає нагрівання структури СНП $\theta_{стал}$:

$$\theta_{стал} = P_{сер} \cdot R_{thj} \quad (6)$$

де $P_{сер} = \frac{\sqrt{2}I_{ном.р}}{Q} \left(0,455 \frac{U_0}{\pi} + 0,114 \cdot \sqrt{2}I_{ном.р} R_d \right)$ –

значення середньої потужності в повторно-короткочасному режимі для трифазного силового гібридного ключа (рис. 4) [3]; $I_{ном.р}$ – діюче значення номінального робочого струму контактора; R_{thj} – сталий тепловий опір тиристора; U_0 – гранична напруга тиристора. R_d – диференціальний опір тиристора.

Таким чином, сумарний нагрів СНП контактора, заздалегідь працюючого в сталому режимі, який вимикає аварійний струм, визначається:

$$\theta = \theta_{стал} + \theta_{кз}$$

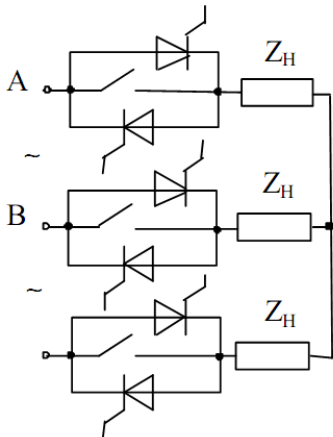


Рис. 4. Схема трифазного силового гібридного ключа

Враховуючи, що контактор повинен в аварійному режимі вимикати струми, що дорівнюють десятикратному робочому струму [1], то в даному ви-

падку $I_{мп.доп} = 10 \cdot \sqrt{2}I_{ном.р}$. Максимально допустима температура напівпровідникової структури типів тиристорів, інформація про які подано в табл. 1, дорівнює 125°C [1], отже можна знайти діюче значення номінального робочого струму контактора $I_{ном.р}$ з рівняння

$$125^0 - T_{навк} = \theta_{стал}(I_{ном.р}) + \theta_{кз}(I_{ном.р}) \quad (7)$$

Для наведеного випадку рівняння (5) набуде вигляду

$$\frac{\sqrt{2}I_{ном.р}}{Q} \left(0,455 \frac{U_0}{\pi} + 0,114 \cdot \sqrt{2}I_{ном.р} R_d \right) \cdot R_{thj} + \int_0^t \left[10\sqrt{2}I_{ном.р} (\sin \omega(t-\tau) - \phi_K) + e^{-\frac{(t-\tau)}{\tau_K}} \sin \phi_K \right] \cdot U_0 + \left[10\sqrt{2}I_{ном.р} (\sin \omega(t-\tau) - \phi_K) + e^{-\frac{(t-\tau)}{\tau_K}} \sin \phi_K \right]^2 \times R_d \frac{\partial}{\partial \tau} r(\tau) d\tau - 85 = 0 \quad (8)$$

У табл. 2 наведені значення $I_{ном.р}$ для усіх типів тиристорів, що розглядаються, які визначені таким чином.

Таблиця 2

Значення параметрів тиристорів

Номінальний струм контактора $I_{ном.р}$, А	Тип тиристора	Гранично допустимий струм контактора $I_{пр.доп}$, А	Номінальний робочий струм контактора $I_{ном.р}$, А		Відношення $\frac{I_{ном.р}}{I_{ном}}$	
			Розрахунковий	Прийнятний	Розрахунковий	Прийнятний
100	T151-100	1132,4	113,2	80	1,13	0,8
160	T161-160	1462,9	146,2	128	0,914	0,8
250	T171-250	2157,5	215,8	200	0,862	0,8
400	T143-400	3471,4	347,1	320	0,868	0,8
630	T143-630	5101,0	510,1	504	0,809	0,8

Також як приклад застосування даної методики нижче наведений розрахунок гранично допустимих струмів короткого замикання в трифазному колі, що вимикатимуться безконтактним НА. Вирази для струму при виникненні короткого замикання в несприятливий момент часу матиме такий же вид (4).

Приймається, що температура оточуючого середовища $T_{окр} = 40^\circ\text{C}$. Застосовуючи дані табл.1 складається аналітичний вираз для перехідного теплового опору, за допомогою (5) складається вираз для перевищення температури структури СНП θ як функції струму та часу.

$$\theta(t, I_m) = \int_0^t i(t-\tau, I_m) \cdot [U_0 + i(t-\tau, I_m) \cdot R_d] \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} r(\tau) d\tau \quad (9)$$

Будується графічна залежність $\theta = f(I_m)$ (рис. 5) за моменту часу t , що дорівнює часу першого проходження струму через нуль при максимально допустимому куті зсуву фаз у колі короткого замикання ($\cos \phi = 0,3$).

Максимально допустима температура напівпровідникової структури типів тиристорів, що розглянуті,

складає 125°C , тому знаходять амплітуду гранично допустимого струму, що вимикається, I_m , при значенні якого перевищення температури складатиме $(125-40)^{\circ}\text{C}$.

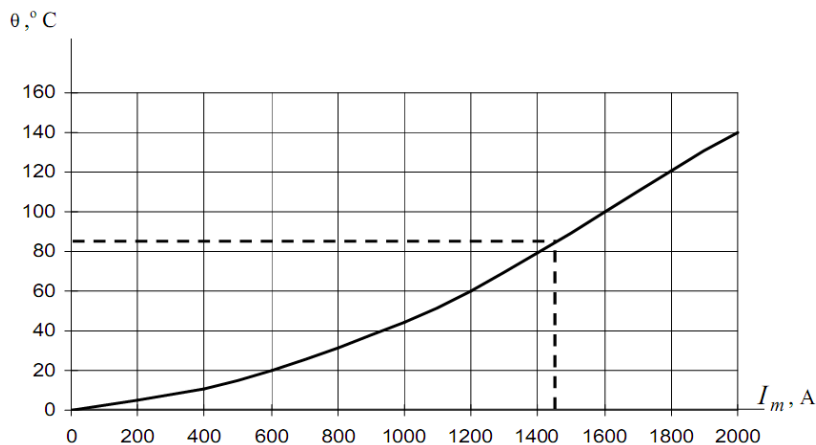


Рис. 5. Залежність перевищення температури СНП від діючого значення приємусової складової аварійного перехідного струму трифазного кола

З рис. 5 визначаємо діюче значення гранично допустимого струму, що вимикається $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 1420$ при $\theta = 85^{\circ}\text{C}$.

Практичні рекомендації, які випливають з результатів даного дослідження, та методика розрахунку використовуються при модернізації на ЗАТ «ЕНАС» (м. Харків) гібридних контакторів змінного струму серій КТ64 и КТП64 і постійного струму серії КП81. Також вони використовуються в навчальному процесі на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова (Україна).

6. Висновки

За результатами досліджень можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що більш повне і точне уявлення про температурне поле СНП дає аналітичний метод, заснований на чисельному розв'язку рівнянь теплопровідності на базі моделі, яка адекватно відображає конструкцію реальних СНП.

При цьому вважалось, що всі втрати в ключі перетворюються в тепло, яке виділяється в площині

кремнієвої пластини паралельно основному $p-n$ переходу (колекторному для біполярного транзистора і IGBT, центральному переходу в тиристорах), а визначення допустимих режимів роботи СНП засновано на оцінці температури переходу T_j , яка повинна бути нижче за деякий граничний рівень, який зазначений в довідкових матеріалах (T_{jmax}).

2. Розроблена методика розрахунку температури структури СНП при дії імпульсів струму довільної форми, яка на відміну від відомих дозволяє з більш високою точністю визначати цю температуру в умовах роботи СНП у складі комутаційних напівпровідникових апаратів, а для виконання розрахунків з її допомогою достатньо мати інформацію тільки про параметри СНП (R_d , U_0 , R_{thj}). Крім того, використання при розрахунках нескладних стандартних програм в середовищі Mathcad роблять цю методику доступною для широкого кола фахівців.

3. Для СНП, що працюють у складі силових напівпровідникових ключів напівпровідникових апаратів постійного струму, проводяться аналогічні розрахунки їхнього теплового режиму, відмінність полягає лише у визначенні потужності втрат в провідному стані СНП [3], оскільки імпульс струму має прямокутну форму. Також для розрахунку теплового режиму повністю керованих СНП (IGBT-транзисторів і двоопераційних тиристорів), що використовуються в НК гібридних контакторів постійного струму, не потрібна апроксимація перехідного теплового опору $r(t)$, оскільки в довідковій літературі наводиться його математичний вираз для конкретного типу СНП у вигляді ряду експонент (3).

4. Описана методика розрахунку може бути застосована в системах автоматизованого проектування як гібридних, так і безконтактних напівпровідникових апаратів.

5. Інженерна методика розрахунку може також застосовуватись при розрахунку теплового режиму СНП, що працюють в імпульсному режимі у складі пристроїв перетворювальної техніки.

Література

1. Сосков, А. Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита [Текст] : учеб. / А. Г. Сосков, И. А. Соскова. – К. : Каравела, 2005. – 344 с.
2. Atmaji, A. M. S. Hybrid Switching: A Review of Current Literature [Text] / A. M. S. Atmaji, J. G. J. Sloot // IEEE-Proceedings of EMPD. – 1998. – Vol. 2. – P. 683–688. doi: 10.1109/empd.1998.702771
3. Сосков, А. Г. Усовершенствованные силовые коммутационные полупроводниковые аппараты низкого напряжения [Текст] : монография / А. Г. Сосков ; Харьк. нац. акад. город. хоз-ва. – Х. : ХНАГХ, 2011. – 156 с.
4. Сосков, А. Г. Гібридні контактори низької напруги з покращеними техніко-економічними характеристиками [Текст] : монография / А. Г. Сосков, Н. О. Сабалаєва ; Харьк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х. : ХНАГХ, 2012. – 268 с.
5. Atmaji, A. M. S. Direct current hybrid breakers: A design and its realization [Text] / A. M. S. Atmaji. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2000. – 195 p.

6. Воронин, П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение [Текст] : справочник / П. А. Воронин; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 384 с.
7. Stan, M. R. Hot spot: A Dynamic Compact Thermal Model at the Processor-Architecture Level [Text] / M. R. Stan, K. Skadron, M. Barcella, W. Huang, K. Sankaranarayanan, S. Velusamy // *Microelectron. J.* – 2002. – Vol. 34, Issue 12. – P. 1153–1165. doi: 10.1016/s0026-2692(03)00206-4
8. Touzelbaev, M. N. High-Efficiency Transient Temperature Calculations for Applications in Dynamic Thermal Management of Electronic Devices [Text] / M. N. Touzelbaev, J. Miler, Y. Yang, G. Refai-Ahmed, K. E. Goodson // *Journal of Electronic Packaging.* – 2013. – Vol. 135, Issue 3. – P. 031001-1–031001-8. doi: 10.1115/1.4024747
9. Hasan, S. The Critical Switching Parameters of a New Hybrid AC Low Voltage Circuit Breaker without and with ZnO Varistor [Text] / S. Hasan // *Liege, Belgium. 6th Int. Symp. On Short-Circuit Currents in Power Sistem, 1994.* – P. 311 – 318.
10. Лыков, Л. В. Теория теплопроводности [Текст] / Л. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
11. Самарский, А. А. Численные методы [Текст] : уч. пос. / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 432 с.
12. Hsu, J. T. A Rational Formulation Thermal Circuit Models for Electrothermal Simulation – Part I: Finite Element Method [Text] / J. T. Hsu, L. Vu-Quoc // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* – 1996. – Vol. 43, Issue 9. – P. 721–732. doi: 10.1109/81.536742