

САБАЛАЄВА НАТАЛІЯ

Київський електромеханічний фаховий коледж

<https://orcid.org/0009-0003-9984-5424>e-mail: natsab152@gmail.com

ІЛЛАРІОНОВ ВАЛЕРІЙ

Київський електромеханічний фаховий коледж

<https://orcid.org/0000-0002-6952-9290>e-mail: infcentr@i.ua

ІНОСОВ СЕРГІЙ

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>e-mail: Inosov.sv@knuba.edu.ua

ПАВЛЕНКО ВОЛОДИМИР

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-2163-8508>e-mail: pavlenko.vm@knuatd.edu.ua

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ СТРУКТУРИ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ ЇХ РОБОТИ В КОМУТАЦІЙНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ АПАРАТАХ

В роботі запропоновано інженерну методику розрахунку температури напівпровідникової структури силових напівпровідникових приладів в умовах їхньої роботи в комутаційних апаратах при дії на них короткочасних імпульсів потужності довільної форми; робота виконана на підґрунті аналізу існуючих методів розрахунку температури структури силових напівпровідникових приладів, що працюють у складі комутаційних апаратів.

Ключові слова: напівпровідниковий апарат, силовий напівпровідниковий прилад, перевищення температури, методика розрахунку

SABALAEVA NATALIYA

Kyiv Electromechanical Vocational College

ILLARIONOV VALERII

Kyiv Electromechanical Vocational College

INOSOV SERHIY

Kyiv National University of Construction and Architecture

PAVLENKO VOLODYMYR

Kyiv National University of Technologies and Design

ANALYSIS OF THE METHODS OF CALCULATING THE TEMPERATURE OF THE SEMICONDUCTOR STRUCTURE OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES IN THE CONDITIONS OF THEIR OPERATION IN SWITCHING SEMICONDUCTOR APPARATUS

In switching semiconductor devices, hybrid and contactless, power semiconductor devices are part of semiconductor switches that provide arc-free switching of electric power flows, i.e. perform the main power function of the switching device. Single-operation devices (thyristors, opto-type thyristors) or two-operation devices (IGBT-transistors, GTO-thyristors, IGCT-thyristors) are used in the mentioned above keys.

The most important factor determining the reliability of this main unit of the switching semiconductor apparatus is the thermal regime of the power semiconductor device in its composition. The main parameter characterizing this mode is the temperature of the semiconductor structure of the power semiconductor device, which depends on the type of the supplied power and its design. Therefore, the calculation of the values of this temperature under the specified operating conditions is one of the most important problems that arise during the development and design of switching semiconductor apparatus. The calculation of the thermal regime of a power semiconductor device used in a semiconductor apparatus is significantly complicated due to the specific form of power pulses dissipated in the semiconductor structure and the non-stationary nature of the thermophysical processes taking place in the power device.

The target of this work is to develop an engineering methodology for calculating the temperature of the semiconductor structure of a power semiconductor device under the action of current pulses of an arbitrary shape with a duration of no more than 0.02 s. This target is realized by analyzing of analytical methods for calculating the temperature of the structure of power semiconductor devices, based on their simplified thermal models.

The proposed method of calculating the temperature of the structure of powerful power semiconductor devices in the pulse mode allows to calculate the non-stationary thermal mode of these devices when they are affected by power pulses of arbitrary shape with a duration of up to 0.02 s. At the same time, in order to perform these calculations, it is sufficient to have information only about the parameters of power semiconductor devices, which are necessary for calculating power losses. In addition, the use of standard easy-to-use programs for calculations makes this technique accessible to a wide range of specialists.

Key words: semiconductor device, power semiconductor device, temperature excess, calculation method.

Постановка проблеми

В комутаційних напівпровідникових апаратах (НА) як гібридних, так і безконтактних, силові напівпровідникові прилади (СНП) входять до складу напівпровідникових ключів (НК), що забезпечують бездугову комутацію потоків електричної потужності, тобто здійснюють головну силову функцію комутаційного апарату. Як СНП у зазначених ключах застосовуються одноопераційні прилади (тиристри,

симістори, оптронні тиристори) або двоопераційні прилади (IGBT-транзистори, GTO-тиристори, IGCT-тиристори).

Аналіз останніх досліджень

Найважливішим фактором, що визначає надійність цього головного вузла комутаційного НА, є тепловий режим СНП, який міститься в його складі [1, 2]. Головним параметром, що характеризує цей режим, є температура напівпровідникової структури СНП, яка залежить від характеру потужності, що подається, та його конструкції. Тому розрахунок значень цієї температури при заданих умовах роботи є однією з найважливіших задач, які виникають при розробці та проектуванні комутаційних НА. Розрахунок теплового режиму СНП, застосованого в НА, помітно ускладнюється внаслідок специфічної форми імпульсів потужності, що розсіюється в напівпровідниковій структурі, та нестационарного характеру теплофізичних процесів, що мають місце в СНП [1, 2, 3].

В [1] показано, що основним режимом роботи СНП, які працюють у складі НА, є імпульсний режим. В цьому режимі вони працюють в гібридних НК змінного струму, в гібридних і безконтактних НК постійного струму, особливо, коли ці прилади застосовуються сумісно зі схемами примусової ємнісної комутації. А також в безконтактних НК змінного і постійного струму при аварійних режимах у колі навантаження. При цьому форма струмового імпульсу може бути довільною з тривалістю до 0,02 с., тобто даний режим СНП широко розповсюджений в НА і потребує детального аналізу. До того ж слід відзначити, що розрахунок температури напівпровідникової структури СНП, які працюють у складі НА в тривалому режимі, досліджений одним з авторів в [4].

Метою роботи є розробка інженерної методики розрахунку температури напівпровідникової структури (в подальшому просто структури) СНП при дії на них струмових імпульсів довільної форми і тривалістю не більше 0,02 с. Ця мета реалізується шляхом аналізу аналітичних методів розрахунку температури структури СНП, виконаних на базі спрощених теплових моделей цих приладів.

Виклад основного матеріалу

Аналіз методів розрахунку теплового режиму СНП. Існує два основні методи визначення температури структури СНП: графо-аналітичний й аналітичний [1]. В теперішній час для розрахунку температури СНП в імпульсному режимі найбільшого розповсюдження одержав перший метод, який оснований на використанні графічної залежності перехідного теплового опору від часу [2]. В [2] розкрито особливості, властиві цьому методу, а також основні правила його застосування. Однак, як показано в [1], застосування цього методу для розрахунку температури структури СНП при дії на них імпульсів струмів, які виникають в умовах їхньої роботи у складі НА, ускладнене через відсутність достатніх вихідних даних і через складність форми імпульсу потужності, особливо в гібридних НА [1].

Аналітичний метод розрахунку теплових характеристик (температури напівпровідникової структури) СНП оснований на чисельному розв'язанні рівнянь нестационарної теплопровідності, складених для внутрішніх елементів конструкції з урахуванням їхнього взаємозв'язку, геометричних розмірів і характеристик застосованих матеріалів. В загальному випадку нестационарні теплові процеси багатопарових систем, таких як, наприклад, вищезгадані СНП, зображуються системою нелінійних рівнянь в часткових похідних з неоднорідними граничними і початковими умовами. Аналітично такі системи рівнянь, як правило, безпосередньо нерозв'язувані, їхнє розв'язання виконується чисельними методами за допомогою математичних програм типу *Matscad*.

Дослідження конструкції СНП показує, що у першому, узагальненому наближенні теплофізична модель цього приладу може бути представлена у вигляді багатопарової системи різнорідних пластин з внутрішнім джерелом тепла, розташованому в напівпровідниковій структурі. Головним елементом цієї моделі є монокристалічна пластина напівпровідника (як правило, кремнію), на якій методом дифузії утворено кілька електронно-діркових переходів, що утворюють напівпровідникову структуру. Ця пластина спільно з термокомпенсаторами називається випрямним елементом, за конструкцією якого сучасні СНП поділяються на дві групи: прилади з припаяними контактами (наприклад, потужні тиристори з гнучким або жорстким виводом) и прилади з притискними контактами (наприклад, потужні «таблеткові» тиристори). В першій групі приладів контакт між напівпровідниковою пластиною і вольфрамовим термокомпенсатором забезпечується методом пайки (рис. 1, а), у другій припаюється тільки нижній термокомпенсатор, контакт же між пластиною і верхнім мідним шаром утворюється за допомогою постійного механічного притискання (рис. 1, б), яке забезпечується конструкцією приладу через м'яку струмопровідну прокладку.

У зв'язку з цим прилади з притискними контактами є більш стійкими до дії температурних циклів та у них краще умови відводу тепла від напівпровідникової пластини, тому СНП на струми вище за 250 А виконуються тільки в «таблетковому» виконанні.

Однак, при якщо брати до уваги короткочасність струмових імпульсів реальним буде припущення, що тепло за час імпульсу не встигає розповсюдитись достатньо далеко від свого джерела (напівпровідникової структури) [1]. Дійсно, в [1] показано, що при аналізі температурного режиму СНП, що працюють в умовах дії короткочасного (до 0,02 с) струмового навантаження, достатньо буде обмежитись тільки аналізом струмової моделі, яка складається в основному з випрямного елемента [1], що суттєво спрощує розв'язання задачі.

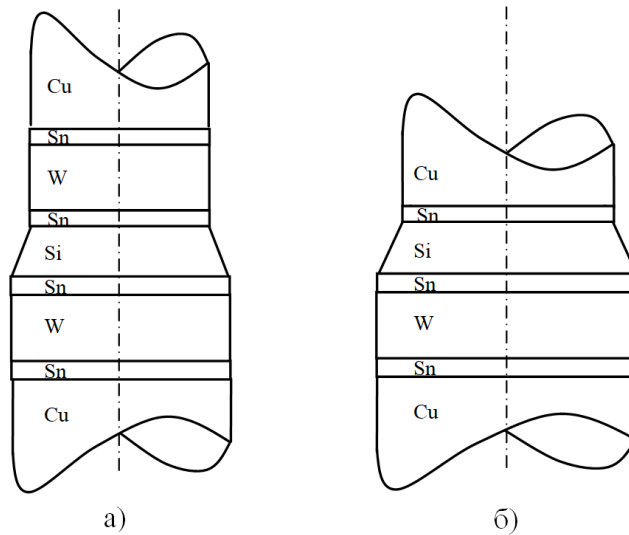


Рис. 1. Варіанти конструкції потужних тиристорів: а) з припаяними контактами, б) з притисними контактами

На рис. 2 представлена спрощена теплова модель СНП (тиристора) з припаяними контактами, в якій урахування шарів припою було здійснено за рахунок умовного розширення шарів вольфраму на товщину, еквівалентну шару припою за тепловим опором [5].

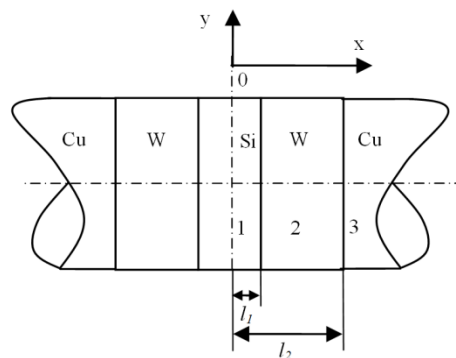


Рис. 2. Теплова модель СНП (тиристора)

Розрахунок рівнянь теплопровідності в пропонованій моделі проводиться при таких припущеннях [1]: відвід тепла від бокової поверхні при короточасному нагріванні ($t_H \leq 0,02$ с) відсутній; розповсюдження тепла в моделі симетричне; всі елементи конструкції (шари кремнію, вольфраму і міді) мають однаковий діаметр, що дорівнює діаметру кремнієвої пластини в її вузькій частині; шар міді представлено у вигляді півобмеженого тіла; вся енергія виділяється рівномірно по об'єму шару кремнію; теплофізичні параметри матеріалів не залежать від температури; вольт-амперна характеристика в прямому напрямку апроксимується пороговою напругою U_0 і лінійною залежністю від струму при $u > U_0$, яка визначається диференціальним опором R_d . Правомірність таких припущень показана в [1].

Розв'язок рівняння теплопровідності для цієї моделі приведено в [5]. При цьому перевищення температури в центрі кремнієвої пластини – найбільш нагрітої частини приладу, має такий вигляд:

$$\theta_m(t) = K \int_0^t P_T(t-\tau) \cdot f_{2m}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\text{де } K = \frac{2b_1 \cdot b_2}{\pi v_1 c_1 \gamma_1} = \frac{2\lambda_1 \sqrt{a_3}}{\sqrt{a_1} \cdot \lambda_3 \pi v_1 \gamma_1}; \quad b_1 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}}; \quad b_2 = \frac{\sqrt{a_3}}{\lambda_3};$$

v – об'єм кремнієвої пластини;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

c – питома теплоємність;

γ – питома щільність;

$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коефіцієнт температуропровідності;

$P_T(t) = i_T(t)[U_0 + i_T(t)R_d]$ – миттєва потужність;

$i_T(t)$ – струм в імпульсі;

$0 < t \leq t_H$, t_H – тривалість імпульсу струму;

$$f_{2m}(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{\sin p_1 u \cdot e^{-u^2 \tau}}{u(A_0^2 + B_0^2)} du, \quad (2)$$

де u – дійсна змінна;

$$p_1 = \frac{l_1}{\sqrt{a_1}}; \quad p_2 = \frac{l_2 - l_1}{\sqrt{a_2}};$$

$$A_0 = \cos p_1 u \cdot \cos p_2 u - b_1 \sin p_1 u \cdot \sin p_2 u;$$

$$B_0 = b_1 b_2 \sin p_1 u \cdot \cos p_2 u + b_2 \sin p_2 u \cdot \cos p_1 u.$$

З виразу (1) витікає, що перехідний тепловий опір тиристора з припаяними контактами матиме такий вигляд:

$$r_1(t) = K \int_0^t f_{2m}(t) dt,$$

де $0 < t \leq t_H$, $t_H \leq 0,02c$.

На рис. 3 наведена спрощена теплова модель СНП (тиристора) «таблеткового» типу з притискними контактами [6]. В ній кремнієва пластина напівпровідникової структури приладу знаходиться в тісному тепловому контакті справа з вольфрамовим термокомпенсатором, а зліва з мідною основою приладу. Причому шари міді й вольфраму наведені у вигляді півобмежених тіл. Правомірність такої заміни для малих відрізків часу (близько 0,02 с) показана в [1, 6]. Крім того, в моделі не врахований тонкий шар припою (близько 0,1 мм) між кремнієвою пластиною й вольфрамовим термокомпенсатором, і тонка прокладка (до 0,2 мм) на основі олова між кремнієм і міддю.

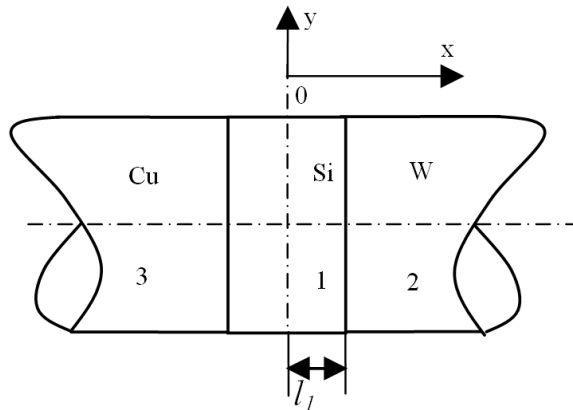


Рис. 3. Розрахункова теплова модель СНП (тиристора) з притискними контактами

Ці шари компенсуються відповідним збільшенням товщини кремнію, яка за тепловим опором дорівнює шарам припою і прокладки, що також допустимо при малих товщинах шарів контактного матеріалу [1].

Розв’язок рівнянь теплопровідності для цієї моделі виконується при тих же припущеннях, що й у попередньому випадку. В результаті виконаних перетворень, наведених в [6], вираз для визначення максимальної температури структури виглядатиме таким чином:

$$\theta_m(t) = \frac{1}{S} \int_0^t \alpha(t-\tau) \cdot P_T(t-\tau) \cdot f_{np}(\tau), \quad (3)$$

де $0 < t \leq t_H$;

S – переріз кремнієвої пластини у вузькій частині;

$\alpha(t) = 4761,5t^3 + 153,7t^2 - 9,4t + 0,5$ – коефіцієнт, який враховує несиметричність розподілу потоку потужності в моделі;

$$f_{np}(\tau) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} (-1)^{n-1} \cdot k_{np}^{n-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot e^{-\frac{2(n-1) \cdot l_1 / \sqrt{a_1}}{4\tau}} \\ - (-1)^{n-1} k_{np}^n \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot e^{-\frac{2n \cdot l_1 / \sqrt{a_1}}{4\tau}} \end{array} \right\},$$

$$k_{np} = \frac{b_{np} - 1}{b + 1}; \quad b_{np} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}.$$

Аналогічно попередньому випадку вираз для перехідного теплового опору для цієї моделі матиме такий вигляд:

$$r_2(t) = \frac{1}{S'} \int_0^t f_{np}(t) dt, \quad (4)$$

де $0 < t \leq t_H$, $t_H \leq 0,02c$.

Таким чином, розрахунок температури структури потужних СНП різних типів їх конструкцій можна виконувати в середовищі Mathcad за допомогою виразів (1) і (3).

Однак, у зв'язку з тем, що при цих розрахунках необхідно вводити інформацію, що характеризує конструкцію конкретного типу СНП, якою, не володіють розробники комутаційних НА, автори пропонують удосконалену методику розрахунку зазначеної температури, позбавлену перелічених недоліків. Суть її полягає в наступному:

1) складні вирази для перехідного теплового опору (2) і (4) представляються для конкретного типу СНП у вигляді ряду експонент типу [2]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}). \quad (5)$$

Таку операцію достатньо просто виконати за допомогою математичного застосунку, про що згадано вище. При цьому проведені дослідження показали, що вже при $n = 2$ похибка апроксимації менш ніж 0,5 %.

В табл. 1 наведені значення для R_i і τ_i , розраховані зазначеним чином, для найбільш розповсюджених потужних тиристорів вітчизняного виробництва;

2) далі для розрахунку перевищення температури структури СНП при дії імпульсної потужності довільної форми $P(t)$ застосовується аналітична формула Дюамеля (інтеграл Дюамеля) [7].

$$\theta = \int_0^t P(t-\tau) \frac{\partial r(\tau)}{\partial \tau} d\tau + P(t)r(0), \quad (6)$$

Таблиця 1

Параметри тиристорів для характеристики їхнього перехідного теплового опору

Тип тиристора	Конструкція контактів	$R_1, \frac{K}{Bm}$	$\tau_1 \cdot 10^{-3}, c$	$R_2, \frac{K}{Bm}$	$\tau_2 \cdot 10^{-3}, c$
T151-100	припаяні	0,01433	20,711	$4,164 \cdot 10^{-3}$	2,917
T161-160	припаяні	0,01433	20,711	$4,164 \cdot 10^{-3}$	2,917
T171-200	припаяні	0,01287	20,548	$2,077 \cdot 10^{-3}$	1,299
T171-320	припаяні	0,01287	20,548	$2,077 \cdot 10^{-3}$	1,299
T143-500	притискні	$6,277 \cdot 10^{-3}$	17,841	$9,507 \cdot 10^{-4}$	1,120
T143-630	притискні	$6,277 \cdot 10^{-3}$	17,841	$9,507 \cdot 10^{-4}$	1,120
T253-1000	притискні	$6,278 \cdot 10^{-3}$	34,259	$1,177 \cdot 10^{-4}$	6,266
T253-1250	притискні	$6,278 \cdot 10^{-3}$	34,259	$1,177 \cdot 10^{-4}$	6,266

де $r(0)$ – перехідний тепловий опір при $t = 0$;

$r_T(t)$ – перехідний тепловий опір;

$P(t)$ – імпульс потужності.

У розгляданому випадку $P(0) = 0$ і $r(0) = 0$.

Обчислення інтегралів доцільно проводити за допомогою Mathcad. При цьому є можливість одержати значення перевищення температури не тільки по завершенню імпульсу струму, а й у будь-який момент його дії.

На рис. 4 наведені криві зміни з часом перевищення температури структури на прикладі розповсюдженого типу тиристора T161-160 при дії на нього синусоїдного імпульсу струму з амплітудою 1400 А і частотою 50 Гц. При цьому крива 1 одержана на підґрунті виразу (1), а крива 2 – на підґрунті виразів (6).

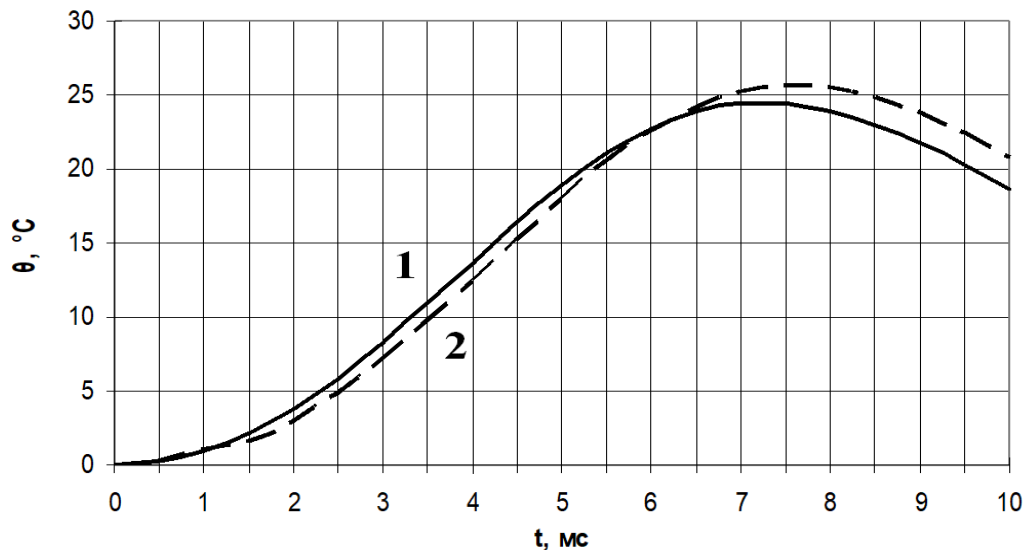


Рис. 4. Криві змінення перевищення температури структури тиристора T161-160: 1 – крива, побудована на основі виразу (1), 2 – крива, побудована на основі виразу (6)

Оскільки криві практично співпадають, то запропоноване методика розрахунку дозволяє одержати результати, які з достатньою точністю для інженерних розрахунків відображають нестационарні теплові процеси, що мають місце в структурі потужних напівпровідникових приладів.

Висновки

Запропонована в роботі методика розрахунку температури структури потужних СНП в імпульсному режимі дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю обчислювати нестационарний тепловий режим цих приладів при дії на них імпульсів потужності довільної форми тривалістю до 0,02 с. При цьому для виконання цих розрахунків достатньо володіти інформацією тільки про параметри СНП, необхідних для розрахунку потужності втрат. Крім того, застосування при розрахунках стандартних програм, зручних у використанні, роблять цю методику доступною для широкого кола спеціалістів.

Література

1. Сосков А. Г. Гібридні контактори низької напруги з покращеними техніко-економічними характеристиками : монографія / А. Г. Сосков, Н. О. Сабалаєва. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2012. – 268 с.
2. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник / О. О. Шавьолкін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.
3. Bingjian Y., Yang G., Xiaoguang W., Zhiyuan H., Longlong C. and Yunhai S. A hybrid circuit breaker for DC-application. 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, USA, 2015, pp. 187-192. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152036.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7152036&isnumber=7151990>
4. Dimitrie Mangeron Thermal Analysis of Power Semiconductor Device in Steady-State Conditions. Adrian Plesca Faculty of Electrical Engineering, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Blvd., 700050 Iasi, Romania Energies 2020, 13(1), p. 21–23. <https://doi.org/10.3390/en13010103>.
5. van der Broeck C. H. et al. Spatial Electro-Thermal Modeling and Simulation of Power Electronic Modules. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 1, p. 404-415, Jan.-Feb. 2018.
6. Takuto Matsui; Hayato Hayashi; Tomohiro Kawashima; Yoshinobu Murakami; Naohiro Hozumi; Toru Matsumoto Nondestructive Fault Localization of Semiconductor Devices with Ultrasound Heating. 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) vol. 60, no. 8, p. 831-835 Date of Conference: 13-17 September 2020. Date Added to IEEE Xplore: 08 January 2021 Publisher: IEEE Conference Location: Tokyo, Japan.
7. Perez M. A., Rodriguez J., Fuentes E. J. and Kammerer F. Predictive Control of AC-AC Modular Multilevel Converters. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 7, p. 2832-2839, July 2012.

References

1. Soskov A. H. Hibrydni kontaktory nyzkoi napruhy z pokrashchenymy tekhniko-ekonomichnymy kharakterystyka-my : monohrafiia / A. H. Soskov, N. O. Sabalaieva. – Kharkiv : KhNUMH im. O.M. Beketova, 2012. – 268 s.
2. Shavolkin O. O. Sylovi napivprovodnykovi peretvoriuvachi enerhii : navch. posibnyk / O. O. Shavolkin. – Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2015. – 403 s.
3. Bingjian Y., Yang G., Xiaoguang W., Zhiyuan H., Longlong C. and Yunhai S. A hybrid circuit breaker for DC-application. 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, USA, 2015, pp. 187-192. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152036. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7152036&isnumber=7151990>
4. Dimitrie Mangeron Thermal Analysis of Power Semiconductor Device in Steady-State Conditions. Adrian Plesca Faculty of Electrical Engineering, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Blvd., 700050 Iasi, Romania Energies 2020, 13(1), p. 21–23. <https://doi.org/10.3390/en13010103>.
5. van der Broeck C. H. et al. Spatial Electro-Thermal Modeling and Simulation of Power Electronic Modules. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 1, p. 404-415, Jan.-Feb. 2018.
6. Takuto Matsui; Hayato Hayashi; Tomohiro Kawashima; Yoshinobu Murakami; Naohiro Hozumi; Toru Matsumoto Nondestructive Fault Localization of Semiconductor Devices with Ultrasound Heating. 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) vol. 60, no. 8, p. 831-835 Date of Conference: 13-17 September 2020. Date Added to IEEE Xplore: 08 January 2021 Publisher: IEEE Conference Location: Tokyo, Japan.
7. Perez M. A., Rodriguez J., Fuentes E. J. and Kammerer F. Predictive Control of AC-AC Modular Multilevel Converters. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 7, p. 2832-2839, July 2012.