

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи
магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Удосконалення та розробка пропозицій до поліпшення якості
методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових
перетворювачів»

КНУ.МР.141.25.665-06

Виконав студент ІІ курсу, групи ЕПА-24м /Андрій КАПІНУС/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____ /Ігор СІНЧУК/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____ /Ігор СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КАПІНУС Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Удосконалення та розробка пропозицій до поліпшення якості
методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів

1. Термін подання студентом роботи: 15 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів. Завданням є удосконалення методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Загальні положення пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів; II. Математична модель теплової схеми керованих силових ключів перетворювально-регулювального блоку; III. Моделі перехідного й стаціонарного теплових режимів керованих силових ключів. IV. Моделювання перехідних і стаціонарних теплових режимів керованих силових ключів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Контекст та теплові потоки в ПРБ; II. Узагальнена тепла модель КСК ПРБ; III. Схема заміщення та матричні рівняння; IV. Моделювання перехідних процесів.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		
IV	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Загальні положення пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів	17.09.25
2	Математична модель теплової схеми керованих силових ключів перетворювально-регулювального блоку	19.10.25
3	Моделі перехідного й стаціонарного теплових режимів керованих силових ключів	24.11.25
4	Моделювання перехідних і стаціонарних теплових режимів керованих силових ключів	07.12.25

Дата видання завдання 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Андрій КАПІНУС
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Удосконалення та розробка пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів», КНУ.РМ.141.25.665-06

Мета дослідження – удосконалення та розробка пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів.

Об'єкт дослідження – методи розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів.

Предмет дослідження – перехідні процеси у структурі тягових перетворювачів.

Тягове електроустаткування вагона, розміщене під вагоном у спеціальних ящиках, є внутрішнім джерелом тепла.

Хоча корпус устаткування в умовах експлуатації часто охолоджується потоком повітря з інтенсивністю близько 1 м/с, розрахунок теплового режиму традиційно ведуть для природного повітряного охолодження при температурі навколишнього середовища +20 °С.

У сталому режимі роботи ПРБ сумарна потужність усіх джерел тепла дорівнює потужності, що розсіюється з поверхні корпуса у навколишнє середовище шляхом конвекції, випромінювання й теплопровідності (зокрема, через шини й днище корпуса).

При проектуванні багатoelementних автономних тягових перетворювачів широко використовується моделювання для визначення раціональних значень техніко-економічних показників керованих силових

ключів (КСК), оскільки точний облік усіх факторів призводить до громіздких і складних теплових моделей.

Оскільки найбільш уразливою й найбільш нагрітою ділянкою КСК ПРБ є р-п перехід силового напівпровідникового приладу, доцільно оцінювати вплив різних факторів саме на його температуру.

Розроблена узагальнена тепла модель КСК, яка враховує розміщення блоку в герметичній оболонці ПРБ вагона і дозволяє суттєво спростити розрахунки теплових режимів силових ключів.

На відміну від існуючих моделей, вона враховує перетин і теплофізичні властивості провідників, що з'єднують елементи КСК, а також не струмоведучі конструкційні деталі, що впливають на тепловий режим.

Для аналізу перехідних теплових процесів конструкція ВСК представляється електротепловою схемою заміщення з джерелом потужності тепловиділення, тепловими потоками, опорами й теплоємкостями.

Для моделювання перехідних теплових процесів можуть застосовуватися метод змінних стану та метод вузлових потенціалів.

Метод вузлових потенціалів визнаний більш доцільним.

Хоча він вимагає на кожному кроці розв'язку матричного рівняння, він допускає крок інтегрування $\Delta t = \tau$ і має більш високу стійкість обчислювального процесу, навіть при великому розкиді постійних часу.

Це вигідно відрізняє його від явного методу Ейлера (використовуваного з методом змінних стану), який вимагає кроку інтегрування не менш, чим на порядок нижче мінімальної постійної часу $\tau_{\min}$.

Автоматизовані розрахунки, проведені на основі моделювання, дозволяють виявити перевантажені ділянки ланцюга теплопередачі й змінити

компонування елементів конструкції для підвищення ефективності розсіювання тепла.

Порівняльний аналіз несиметричної і симетричної конструкції системи охолодження ВСК показав, що симетричний ланцюг теплопередачі силового напівпровідникового приладу дозволяє підвищити потужність розсіювання:

У тепловому режимі, що встановився (при перегріві 50-70 °С), потужність підвищується в 1,3 - 1,5 рази.

У короткочасному (вартовому) режимі потужність підвищується в 1,5 - 1,6 рази.

Результати математичного моделювання теплових режимів блоків мають достатнє збіг із результатами експериментів на фізичних макетах для інженерної практики.

ТЯГОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ,
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ, ПОЛІПШЕННЯ
ЯКОСТІ

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Загальні положення пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів	9
Розділ 2. Математична модель теплової схеми керованих силових ключів перетворювально-регулювального блоку.....	12
Розділ 3. Моделі перехідного й стаціонарного теплових режимів керованих силових ключів	16
Розділ 4. Моделювання перехідних і стаціонарних теплових режимів керованих силових ключів	20
Висновки	30
Список використаних джерел.....	31
Додатки.....	33

Вступ

Установлене, що оскільки найбільш уразливою й найбільш нагрітою ділянкою ВСК ПРБ є р-п перехід силового напівпровідникового приладу, доцільно оцінювати вплив різних факторів на його температуру й урахувати, у яких випадках можна зневажити тем або іншим фактором.

Розроблена узагальнена теплова модель КСК із обліком їх розміщення в герметичній оболонці блоку ПРБ вагона, яка дозволяє суттєво спростити розрахунки теплових режимів силових напівпровідникових ключів фазного модуля.

Показане, що для моделювання перехідних теплових процесів доцільніше застосувати метод вузлових потенціалів, при яким базисними змінними є теплові потоки й перегрів між вузлами галузей схеми й незалежним вузлом, що характеризують термопотенціал навколишнього середовища.

Він має більш високу стійкість обчислювального процесу, навіть при великому розкиді постійних часу.

Порівняльний аналіз несиметричної й симетричної конструкції системи охолодження ВСК показує, що при перегріві $V = 50-70$ °C у тепловому режимі, що встановився, симетричний ланцюг теплопередачі силового напівпровідникового приладу дозволяє підвищити потужність розсіювання в 1,3 - 1,5 рази, а у вартовому - в 1,5 - 1,6 рази.

Розділ 1. Загальні положення пропозицій до поліпшення якості методів розрахунку перехідних процесів у структурі тягових перетворювачів

Тягове електроустаткування вагона розміщується під вагоном на його рамі в спеціальних ящиках для захисту від пилу, снігу, вологи [12], корпус яких в умовах експлуатації прохолоджується потоком повітря з інтенсивністю близько 1 м/с [11,12].

Однак тепловий режим розраховують під природне повітряне охолодження при температурі навколишнього середовища +20 °С.

Розміщені усередині корпуса, елементи схеми є внутрішніми джерелами тепла.

У режимі, що встановився, роботи ПРБ сумарна потужність усіх джерел тепла дорівнює потужності, що розсіюється з поверхні корпуса ПРБ у навколишнє середовище.

З поверхні ПРБ тепло частково передається в підвідні шини й днище корпуса шляхом теплопровідності, а потім з їхньої поверхні передається в навколишнє середовище, а частково передається безпосередньо середовищу шляхом конвекції, випромінювання й теплопровідності.

$$Q = a_k \cdot S_k \cdot \Theta - 2 \cdot \lambda_{ш} \cdot S_{ш} \cdot \frac{dT''}{dl} - \lambda_d \cdot S_d \cdot \frac{dT''}{dl}, \quad (1.1)$$

$$\text{де } \Theta = m \cdot T - T_c,$$

T - температура відповідної поверхні;

T_c - температура середовища;

α_k - коефіцієнт тепловіддачі корпусу;

S_K - поверхня охолодження корпусу ПРБ;

$\lambda_{ш}, \lambda_d$ коефіцієнти теплопровідності відповідно шин і днища вагона;

$S_{ш}$ - поперечний переріз шин, що підводять;

S_d - поверхня контакту корпусу ПРБ і днища вагона;

$\frac{dT}{dl}$ - градієнт температури в місці контакту по відповідній до координати l .

При проектуванні багатoeлементних автономних тягових перетворювачів широко використовується моделювання, що дозволяє за допомогою ЕОМ визначити раціональні значення техніко-економічних показників керованих силових ключів (КСК) перетворювально-

регулювального блоку тягової асинхронної електропередачі вагона, не проводячи численних натурних експериментів.

Важливу роль для визначення раціональних значень параметрів КСК відіграє моделювання теплових процесів, що відбуваються в них.

Однак методика подібних розрахунків дуже громіздка, що зв'язане зі складним характером теплових взаємозв'язків елементів КСК один з одним, з оболонкою й навколишнім середовищем.

Точний облік усіх факторів приводить до дуже складних теплових моделей, користуватися якими на практиці надзвичайно важко.

Тому в тепловій моделі доводиться враховувати найбільш істотні фактори, зневажаючи несуттєвими [13].

Розділ 2. Математична модель теплової схеми керованих силових ключів перетворювально-регулювального блоку

В існуючих теплових моделях КСК [11,12] не врахований ряд факторів, що суттєво впливають на тепловий режим елементів КСК, зокрема, перетин провідників, що з'єднують різні елементи КСК, що не дозволяє об'єктивно врахувати його тепловий режим і вимагає виконання додаткових досліджень.

Для складання узагальненої теплової моделі КСК спочатку слід докладно описати теплові моделі окремих елементів КСК, що існують теплові зв'язки й обґрунтувати спосіб вистави їх на тепловій схемі, як це розглянуте в [13], де пропонується методика розрахунків стаціонарного теплового режиму будь-якого КСК, що перебуває в оболонці, на основі узагальненої теплової схеми.

Причому, у цій схемі враховуються геометричні розміри й теплофізичні властивості провідників, що з'єднують елементи КСК один з одним і із зовнішніми пристроями, а також не струмоведучі конструкційні деталі, що впливають на тепловий режим.

Узагальнена тепла модель КСК ПРБ, встановленого на масивній тепловідвідній основі (днищі вагона), представлена на рис. 2.1.

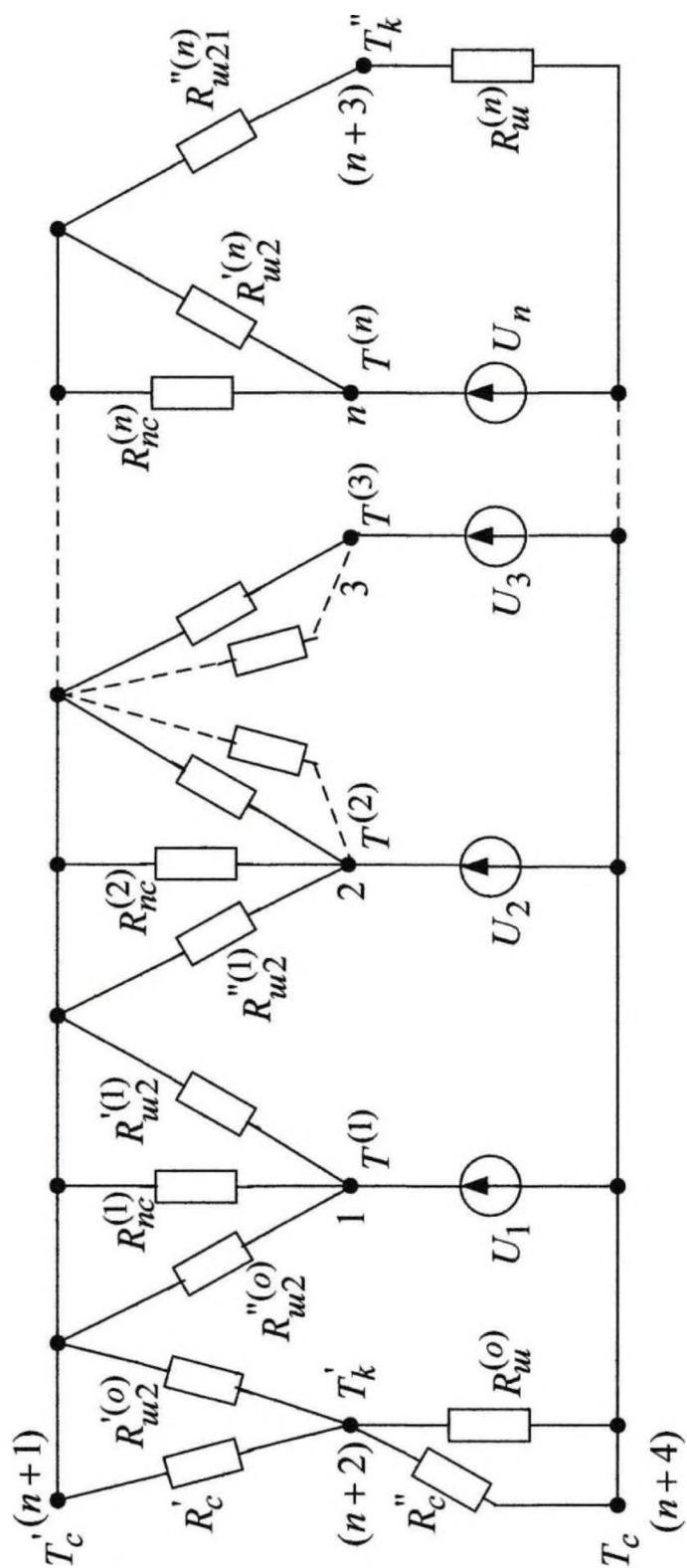


Рис. 2.1. Узагальнена теплова модель КСК ПРБ

Узагальнена теплова модель КСК ПРБ, де:

U_i - джерело тепла, $i = 1, 2, \dots, n$;

R_{nc} - тепловий опір переходу «поверхня джерела тепла - повітря» (або інше середовище) в КСК;

T_c - середньооб'ємна температура повітря в корпусі ;

T_k - температура провідників або шин у місці виходу з корпуса;

$T^{(i)}$ — середньоповерхнева температура джерела тепла;

T_c - температура навколишнього середовища;

$R_{ш}^{(o)}$ і $R_{ш}^{(n)}$ - теплові опори провідників, що підводять, КСК (з урахуванням тепловіддачі з їхньої поверхні);

$R_{ш2}^{(i)}$ і $R_{ш2}^{(i)}$ - теплові опори провідника, (з'єднуючого джерела тепла U_i і U_{i+1}), обумовлені відводом тепла за рахунок теплопровідності;

R_c - тепловий опір, обумовлене відводом тепла від повітря в корпусі КСК через його стінки до навколишнього середовища.

Штрих - пунктиром показані теплові опори додаткових провідників, що з'єднують поверхні відповідних джерел тепла (наприклад, при паралельнім з'єднанні джерел тепла).

На основі теплової моделі в конкретних умовах можна визначити раціональний тепловий режим КСК.

В [13] описана тепла модель перетворювача в загальному виді, але конкретне її застосування вимагає роз'яснень. В [14,15] на прикладі спрощеної схеми перетворювача досить широкого застосування пояснюються особливості складання теплової схеми ВСК, а також проводиться аналіз впливу різних факторів на тепловий режим КСК і пропонується, у яких випадках можна зневажити тем або іншим фактором.

У зв'язку з тим, що найбільш уразливою й найбільш нагрітою ділянкою ВСК НРБ є р-п перехід силового напівпровідникового приладу, доцільно оцінювати вплив різних факторів на температуру р-п переходу.

Розділ 3. Моделі перехідного й стаціонарного теплових режимів керованих силових ключів

Для аналізу перехідних, що й установилися теплових процесів конструкція ВСК представляється електротепловою схемою заміщення із джерелом потужності тепловиділення P_e , тепловими потоками P_c в опорах P_r , однорідних елементів з теплоємкостями C_{th} .

По методу змінних стану базовими ухвалюються теплові потоки в теплоємкостях P_c і різниця термопотенціалів V_c на їхніх виводах.

Система рівнянь для однокрокового інтегрування явним методом Ейлера з інтервалом Δt має вигляд:

$$P_c(k) = f[P_R(k), V_c(k), P_e, R_{th}]$$

$$V_c(k + 1) = f[V_c(k), P_c(k), C_{th}, \Delta t], \quad (3.1)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$ - поточний дискретний момент часу;

Δt - інтервал дискретизації часу.

Інтервал дискретизації Δt для інтегрування явним методом Ейлера необхідно вибирати, виходячи з наступних передумов:

- збільшення шуканої функції X , наприкінці інтервалу Δt визначене її похідній $X'(k)$ у початковій крапці цього інтервалу;
- при будь-якому розрахунковому інтервалі $\Delta t > 0$ існує викривлення точної величини X у режимі, що встановився.

Але при значенні $\Delta t \geq \tau$ починаючи з першого інтервалу дискретизації, спотворюється не тільки величина, але знак X .

Щоб знизити викривлення фактичного характеру перехідного процесу до мінімально припустимої величини, інтервал Δt повинен бути як мінімум на порядок менше параметра τ .

Метод змінних стану для моделювання перехідних процесів відрізняється мінімальними розмірами математичної моделі.

Однак розрахунки повного перехідного теплового процесу із тривалістю не менш $4,6 \tau_{max}$ (τ_{max} - максимальна постійна часу) утруднений.

Внаслідок обмеженої величини інтервалу дискретизації перехідного процесу витрати машинного часу надлишкові за умови $\tau_{max} \gg \tau_{min}$.

Для моделювання перехідних теплових процесів крім методу змінних стану можна застосувати метод вузлових потенціалів.

По методу вузлових потенціалів базисними змінними є теплові потоки P_C і P_R , а також перегрів між вузлами галузей схеми й незалежним вузлом, що характеризують термопотенціал навколишнього середовища.

Система рівнянь для інтегрування неявним методом Ейлера має вигляд:

$$f[P_C(k), P_R(k)] = 0;$$

$$f[P_C(k), V_{\text{по}}(k), V_{\text{ко}}(k), V_C(k-1), C_{th}, \Delta t] = 0; \quad (3,2)$$

$$f[V_{\text{по}}(k), V_{\text{ко}}(k), P_R(k), R_{th}] = 0.$$

При розв'язку системи рівнянь (3.2) інтервал дискретизації Δt вибирається з наступних умов:

- приріст шуканої функції X , наприкінці інтервалу Δt повинне визначатися похідній $X'(k+1)$ у кінцевій крапці цього інтервалу;
- при будь-якому розрахунковому інтервалі $\Delta t > 0$ існує викривлення точної величини X у режимі, що встановився.

Однак у порівнянні з явним методом чисельного інтегрування збільшення $\Delta t > \tau$ не веде до зміни знака наближеного розв'язку й до обчислювальної нестійкості.

Якщо ж прийнятий інтервал дискретизації $\Delta t \ll \tau$, те виключаються по теоремі Котельникова, тільки високочастотні гармоніки, півперіод яких менше, або дорівнює інтервалу Δt .

Отже, значення Δt достатнє вибрати не перевищуючим мінімальну постійну часу τ_{min} .

Проаналізувавши ці методи, можна зробити вивід, що система рівнянь (3.1) має значно менше число рівнянь, але вимагає кроку інтегрування τ_{min} не менш, чим на порядок нижче мінімальної постійної часу $\tau_{min} = R_{th\ min} C_{th\ min}$, у той час як система рівнянь (3.2) допускає крок $\Delta t = \tau$ і вимагає на кожному кроці розв'язку матричного рівняння $[A] \cdot [X] = [B]$ з постійними коефіцієнтами й змінними вільними членами.

Однак стійкість обчислювального процесу в другому випадку вище, навіть при великому розкиді постійних часу, що робить метод вузлових потенціалів кращим для моделювання перехідних теплових процесів.

Розділ 4. Моделювання перехідних і стаціонарних теплових режимів керованих силових ключів

Автоматизований розрахунок граничної потужності, що розсіюється елементами конструкції, скорочує етап фізичного моделювання при розробці автономних тягових перетворювачів.

У роботах [13-15] розглянуті схеми заміщення ланцюгів теплопередачі для режиму, що встановився, і теплові опори елементів конструкції.

Однак, у короткочасних режимах, за рахунок теплоємностей найбільш масивних елементів, потужність джерел тепловиділення може бути підвищена.

Розглянемо формування моделі конструкції ключа перетворювально-регулювального блоку й оцінимо можливість підвищення потужності в годинному режимі [16].

Вихідними даними для моделювання прийняті:

P_j - потужність тепловиділення в елементі;

L, S, λ довжина, перетин теплопроводу й коефіцієнт теплопровідності;

α - усереднений коефіцієнт тепловіддачі з поверхні охолодження;

G_m, C_m - питомі значення маси й теплоємності;

A, B, H, R - геометричні розміри, що характеризують обсяг елемента теплопроводу V_m .

У результаті моделювання на ЕОМ формуються відеограми миттєвих значень перегрівів ізотермічних поверхонь елементів конструкції над температурою навколишнього середовища, що дозволяє виявити перевантажені ділянки ланцюга теплопередачі й змінити компоновання або розміри елементів конструкції для підвищення ефективності розсіювання тепла.

На рис. 4.1. представлені конструкції силових напівпровідникових приладів, розміщених у герметичному корпусі 5.

Силовий напівпровідниковий прилад 6 таблеткової конструкції встановлений на охолоджувачах - накопичувачах 3, використовуваних для збільшення перетину тепловідводу й у якості теплоємності для прискорення передачі теплового потоку через ізоляцію 2 і корпус 5 у короткочасних режимах.

У несиметричній конструкції приладу (рис. 4.1,а) ланцюг теплопередачі від катода приладу містить кронштейн 7, з'єднаний з корпусом 5.

У симетричній конструкції (рис. 4.1,б) силовий напівпровідниковий прилад 6 укладений у корпус - охолоджувач 8 з оребреними стінками й має аналогічні елементи тепловідводу як з боку анода, так і з боку катода й підключається через герметичні виводи до вихідного пристрою керування 9.

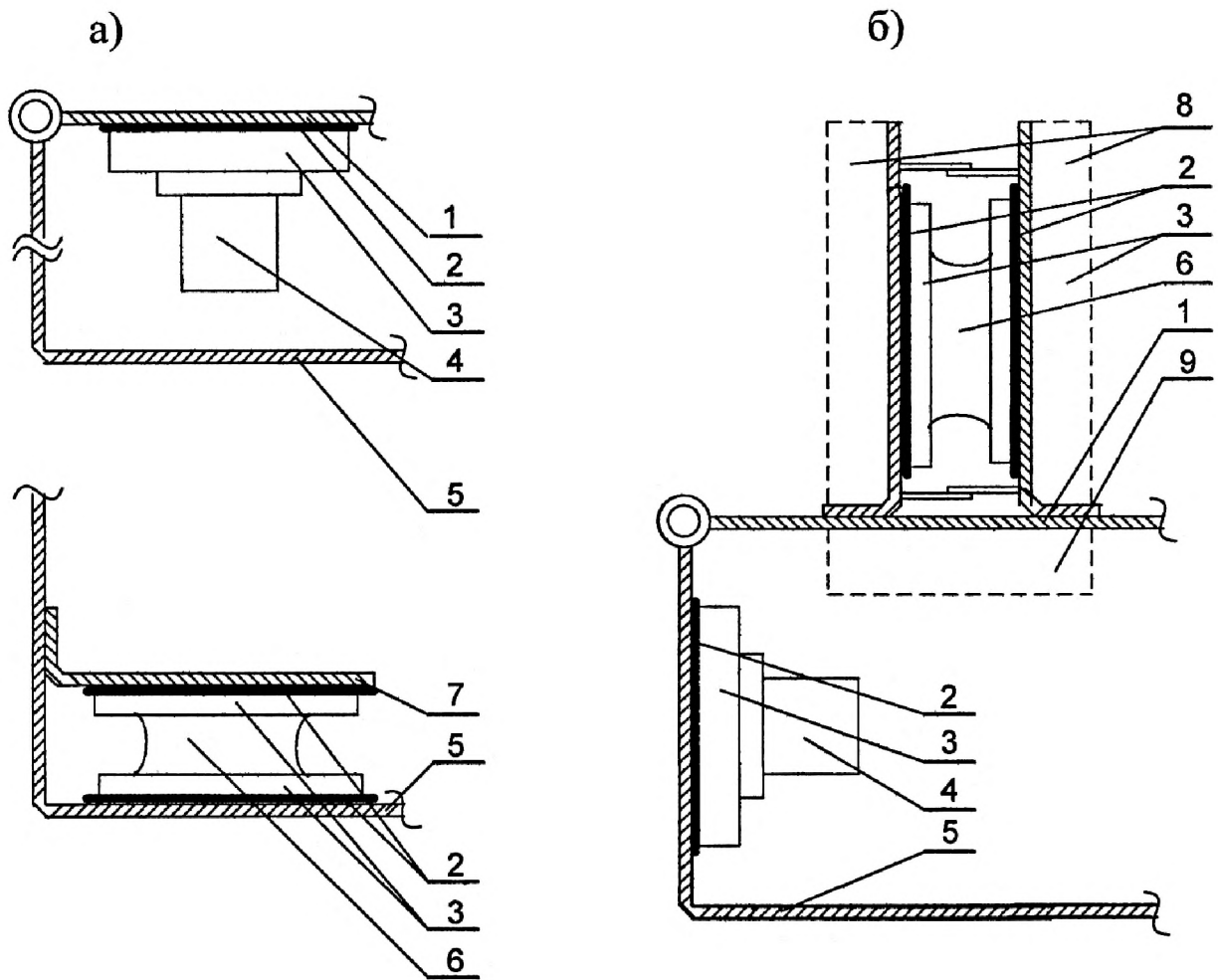


Рис. 4.1. Конструкції силових напівпровідникових приладів, розміщених у герметичному корпусі:

а) - несиметрична конструкція; б) - симетрична конструкція

Штировий силовий напівпровідниковий прилад 4 (рис. 4.1 а,б) має з боку анода елементи тепловідводу, аналогічні таблетковому приладу, а з боку катода - тільки зовнішню поверхню охолодження приладу.

У схемі заміщення конструкції КСК (рис. 4.2) джерела потужності P_{j1} , P_{j2} з тепловими опорами ланцюга теплопередачі замикаються на нульовий вузол, що характеризує температуру навколишнього середовища.

Із джерелом потужності тепловиділення в силовому напівпровідниковому приладі з'єднані внутрішні теплові опори у бік анода R_{ja} і катода R_{jk} .

У розгалуження включаються теплові опори однорідних компонентів і їх теплоємності, наприклад, мідного або силумінового охолоджувача - накопичувача R_{ha} , R_{hk} , скломіканітового ізолятора - R_{ia} , R_{ik} , сталевго корпуса - R_{ka} , R_{kk} , силумінового кронштейна охолоджувача - R_{ck1} , R_{ck2} , і граничного із кронштейном шару повітря - R_{oa} , R_{ok} , R_{ck3} . Якщо елемент конструкції, що входить до складу ланцюга теплопередачі, безпосередньо контактує з навколишнім середовищем, то його теплоємність урахується між вузлом з максимальним температурним потенціалом елемента й нульовим, інакше теплоємність включається між вузлами елемента.

Взаємна теплопередача між джерелами потужності враховується через теплові опори граничних з корпусами приладів шарів повітря усередині корпуса, наприклад, через R_{jk2} і R_{ck3} .

Для симетричної конструкції КСК (мал.4.1,б) взаємна теплопередача між приладами штирової й таблеткової конструкції не враховується.

За схемою заміщення формуються топологічні рівняння на основі I - закону Кірхгофа для теплових потоків P , у незалежних вузлах.

$$\sum P_i = 0, \quad (4.1)$$

де $I = 1, 2, 3 \dots$

Кожний елемент ланцюга теплопередачі розглядається в системі трьох вузлів: початкового, кінцевого, з номерами n і k , по напрямку теплового потоку P_i і нульового.

Для теплових опорів R_{ti} компонентні рівняння складаються на основі алгебраїчної форми закону Ома - Фур'є у вигляді:

$$V_{no} - V_{ko} - P_i \cdot R_{ti} = 0, \quad (4.2)$$

де V_{no} , V_{ko} - шукані перегріви вузлів елемента щодо температури навколишнього середовища.

Для визначення моделі теплоємності

$$C_{tm} = C_m \cdot G_m \cdot V_m,$$

де $V_m = f(A, B, H, R)$ - обсяг елемента конструкції, вихідної є диференціальна форма вистави теплового потоку $P_i = C_{tm} \cdot P/dt$

Для чисельних розрахунків на ЕОМ виконані заміни:

$$dV_c \rightarrow \Delta V_c = V_{no} - V_{ko} - V_{c_{mo}},$$

де $V_{c_{mo}}$ - початкове значення різниці термопотенціалів m - її теплоємності $dt \rightarrow \Delta t = C_{t_{min}} \cdot R_{t_{min}}$ - інтервал дискретизації при використанні неявного методу інтегрування Ейлера.

З метою визначення перегрівів елементів ланцюги теплопередачі в короткочасних режимах базисним інтервалом часу прийняте значення $T=3600$ С, тоді відносний інтервал дискретизації $\Delta t^* = \Delta t/T$

Використовуване в системі алгебраїчних рівнянь компонентне рівняння для теплоємності має вигляд:

$$P_i \cdot \Delta t^* - C_{tm} \cdot \frac{V_{no}}{T} + C_{tm} \cdot \frac{V_{ko}}{T} = -C_{tm} \cdot \frac{V_{cmo}}{T} \quad (4.3)$$

Система рівнянь (4.1.) - (4.3.) у матричному виді $|A| \cdot |X| = |B|$, що характеризує конструкцію КСК, є алгебрізованої зі змінними вільними членами (рис. 4.3).

$ X $									$ B $
	P_1	P_2	P_3	P_4	V_{10}	V_{20}	V_{30}	V_{40}	
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$ A $	1		-1						1 P_{j1}
	2		-1	1					2 P_{j2}
	3		$Rt2$		1			-1	3
	4	$Rt1$				1	1		4
	5		$Rt3$				1		5
	6	Δt^*				$-C_{t1}/T$			6 $-C_{t1} \cdot V_{C10}/T$
	7		Δt^*		C_{t2}/T		C_{t2}/T		7 $C_{t2} \cdot V_{C20}/T$
	8			Δt^*				$-C_{t3}/T$	8 $-C_{t3} \cdot V_{C30}/T$

Рис. 4.3. Матрична система рівнянь (4.1) - (4.3)

Вектор невідомих $|X|$ містить вузлові перегріву V_{io} і теплові потоки P_i у матрицю $|A|$ входять коефіцієнти при невідомих, а вектор вільних членів $|B|$ містить джерела потужності P_j та елементи типу $-C_{tm} \cdot V_{Cmo} / T$, що характеризують початковий запас енергії в теплоємкостях C_{tm} і обумовлені на наступних інтервалах дискретизації через обчислені значення перегрівів вузлів

$$V_{Cmo} = V - X,$$

де p, q - номери вузлів, до яких приєднана m - таячи теплоємність.

Кількість рівнянь дорівнює сумі кількості незалежних вузлів і галузей схеми.

Номери рядків відповідають номерам рівнянь, верхні рядки - топологічним рівнянням виду (4.1), а середні й нижні - компонентним рівнянням виду (4.2) і (4.3).

Елементи стовпців містять коефіцієнти при невідомих P_i, V_{no}, V_{ko} .

У кожному стовпці як мінімум два елементи: один - з топологічної підсистеми рівнянь, другий - з компонентної підсистеми.

Вектор невідомих $|X|$ обчислюється $K_{\max}$ раз по алгоритму Гауса для розрідженої матриці $|A|$ на інтервалі моделювання годинного режиму або до теплового режиму, що встановився:

$$K_{max} = Kx \quad (4.4)$$

Матрична система рівнянь (4.1)-(4.3) слушна в будь-який момент інтервалу моделювання й значення миттєвих перегрівів корпусів силових напівпровідникових приладів дозволяють оцінити граничну потужність розсіювання P_{jm} у короткочасних і тривалих режимах роботи.

Порівняльний аналіз несиметричної (рис. 4.1,а) і симетричної (рис. 4.1,б) конструкції показує, що при перегріві $V = 50 - 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ у тепловому режимі, що встановився, симетричний ланцюг теплопередачі тиристорного блоку дозволяє підвищити потужність розсіювання в 1,3 - 1,5 рази, а у вартовому - в 1,5 - 1,6 рази.

Експерименти на фізичних макетах дають достатнє для інженерної практики збіг з результатами математичного моделювання теплових режимів блоків.

Висновки

1. Установлене, що оскільки найбільш уразливою й найбільш нагрітою ділянкою ВСК ПРБ є р-п перехід силового напівпровідникового приладу, доцільно оцінювати вплив різних факторів на його температуру й ураховувати, у яких випадках можна зневажити тем або іншим фактором.
2. Розроблена узагальнена теплова модель КСК із обліком їх розміщення в герметичній оболонці блоку ПРБ вагона, яка дозволяє суттєво спростити розрахунки теплових режимів силових напівпровідникових ключів фазного модуля.
3. Показане, що для моделювання перехідних теплових процесів доцільніше застосувати метод вузлових потенціалів, при яким базисними змінними є теплові потоки й перегрів між вузлами галузей схеми й незалежним вузлом, що характеризують термопотенціал навколишнього середовища. Він має більш високу стійкість обчислювального процесу, навіть при великому розкиді постійних часу.
4. Порівняльний аналіз несиметричної й симетричної конструкції системи охолодження ВСК показує, що при перегріві $V = 50-70$ °C у тепловому режимі, що встановився, симетричний ланцюг теплопередачі силового напівпровідникового приладу дозволяє підвищити потужність розсіювання в 1,3 - 1,5 рази, а у варттовому - в 1,5 - 1,6 рази.

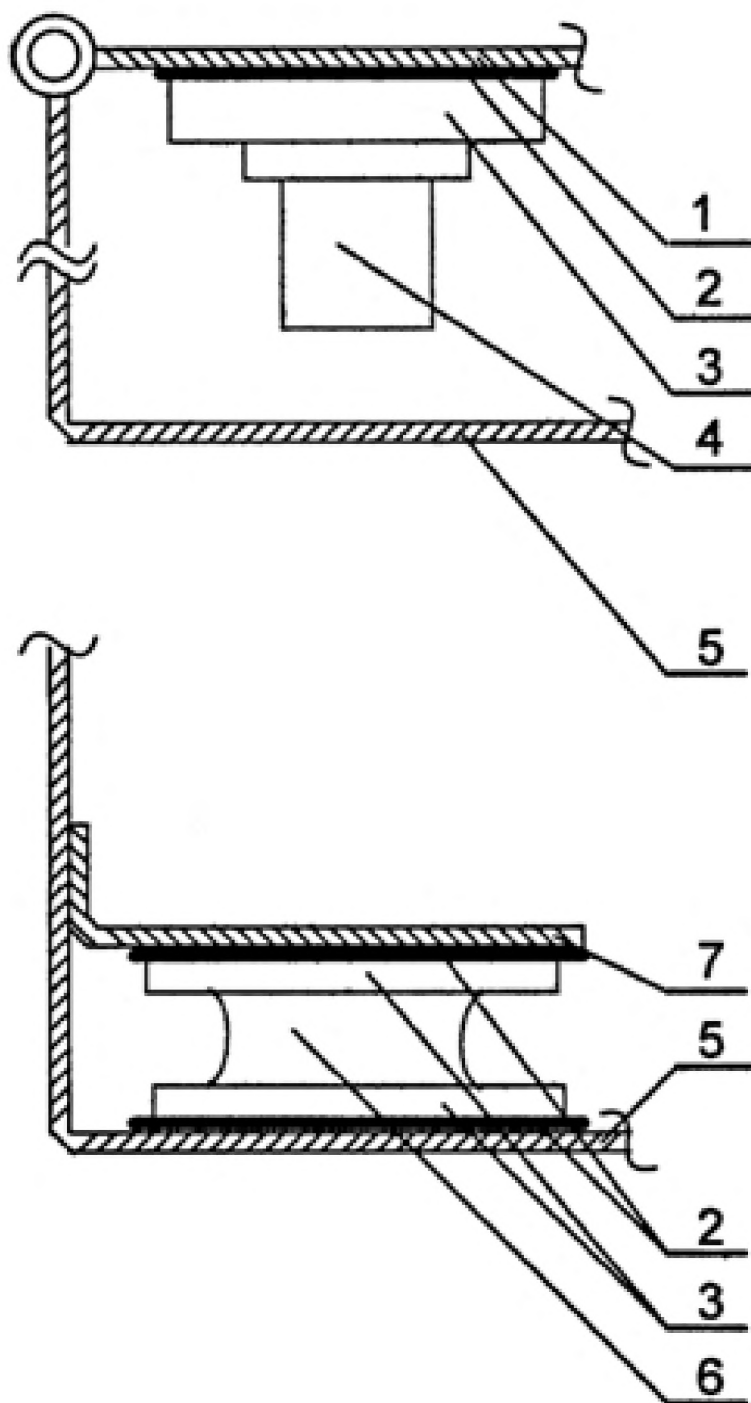
Список використаних джерел

1. Гаврилов Я.І., Мнацаканов В.А. Вагони метрополітену з імпульсними перетворювачами. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.
2. Сементовський Е.І., Севастьянов М.С., Іткінсон В.А. Технічне обслуговування та ремонт рухомого складу метрополітенів. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.
3. Ротанов Н.А., Захарченко Д.Д., Плакс А.В. та ін. Проектування систем керування електрорухомим складом. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
4. Ротанов Н.А., Кубасов А.С., Биков Ю.Г., Литовченко В.В. Електрорухомий склад з асинхронними тяговими двигунами. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
5. Oi Y., Kato S., Kato T., Yajima A., Ujiie A., Takahara E. Силові перетворювачі на IEGT для тягових систем Шинкансену. // Т. IEE Japan, vol. 121 – D, №3, 2001. – p. 356 – 362.
6. Міяшита Т. Технології HITACHI для залізниць. // Тез. доп. IV Міжнародної науково-техн. конференції "Стан і перспективи розвитку залізничного складу" Новочеркаськ: ВАТ "ВЕЛНІІ", 2003. – с. 16–20.
7. Rendusara D., Engeti P. Покращена конфігурація вихідного фільтра зменшує синфазні та диференціальні du/dt на клеммах двигуна в системах ШІМ-приводу. / IEEE Trans. on Power Electronics, V. 13, 1998, №6. – p. 1135–1143.
8. Сусллова К. Н., Лещев А. И. Обґрунтування варіанта схеми автономного інвертора напруги на модулях IGBT електровозів змінного струму з асинхронними тяговими двигунами. // Вестник ОАО "ВЕЛНІІ", 1(50), Новочеркаськ, 2006. – с. 148 – 159.

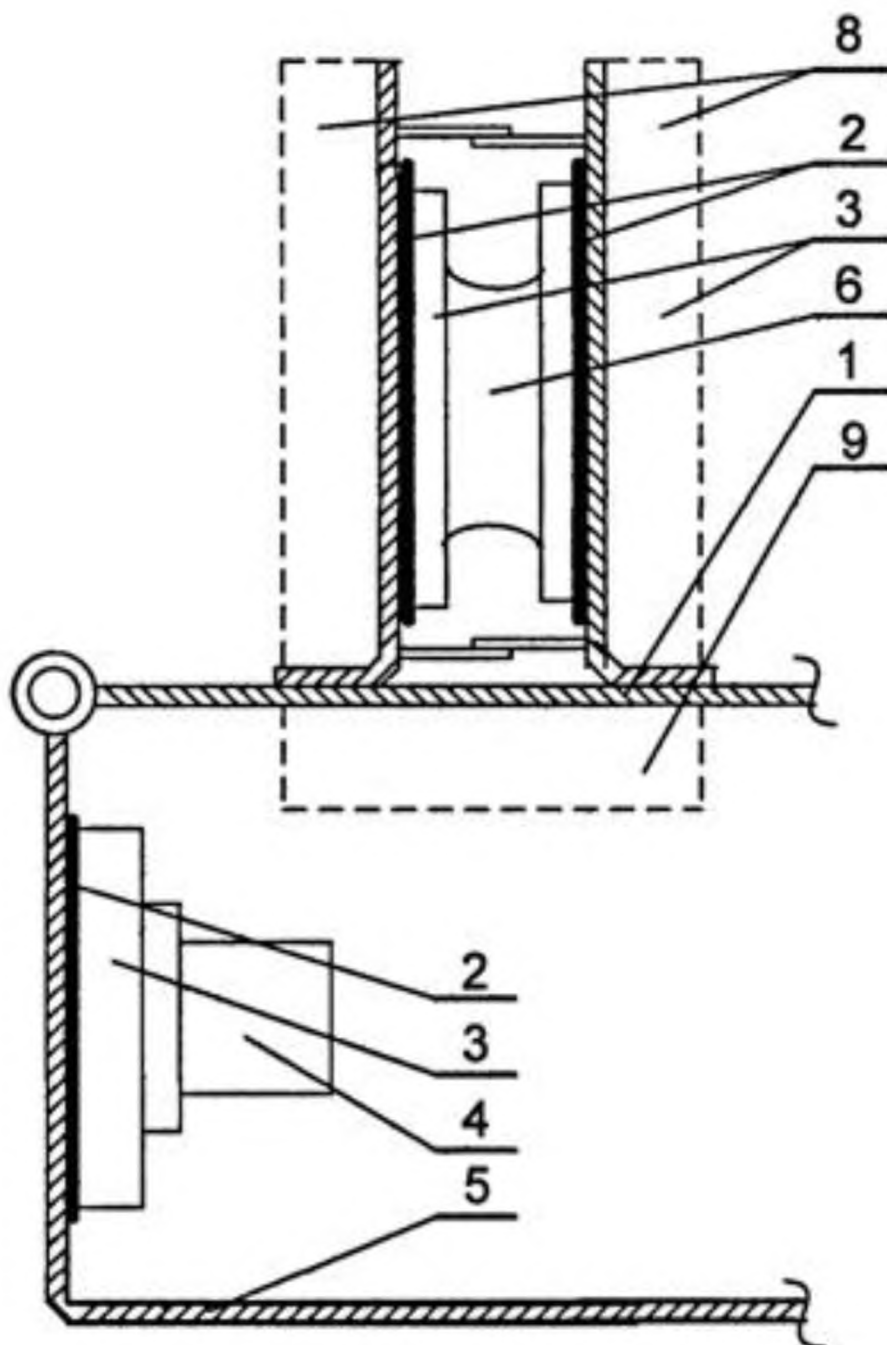
9. Резенфельд В.Е., Шевченко В.В., Майбога В.А., Долаберидзе Г.П. Тиристорне керування електричним рухомим складом постійного струму. – М.: Транспорт, 1970. – 240 с.

10. Сорін Л.Н. Підвищення ефективності електровозів нових поколінь на основі застосування сучасних інформаційних технологій. / Автореферат дис. на здобуття вч. ст. докт. техн. наук, М.: МПТ, 2005. – 38 с.

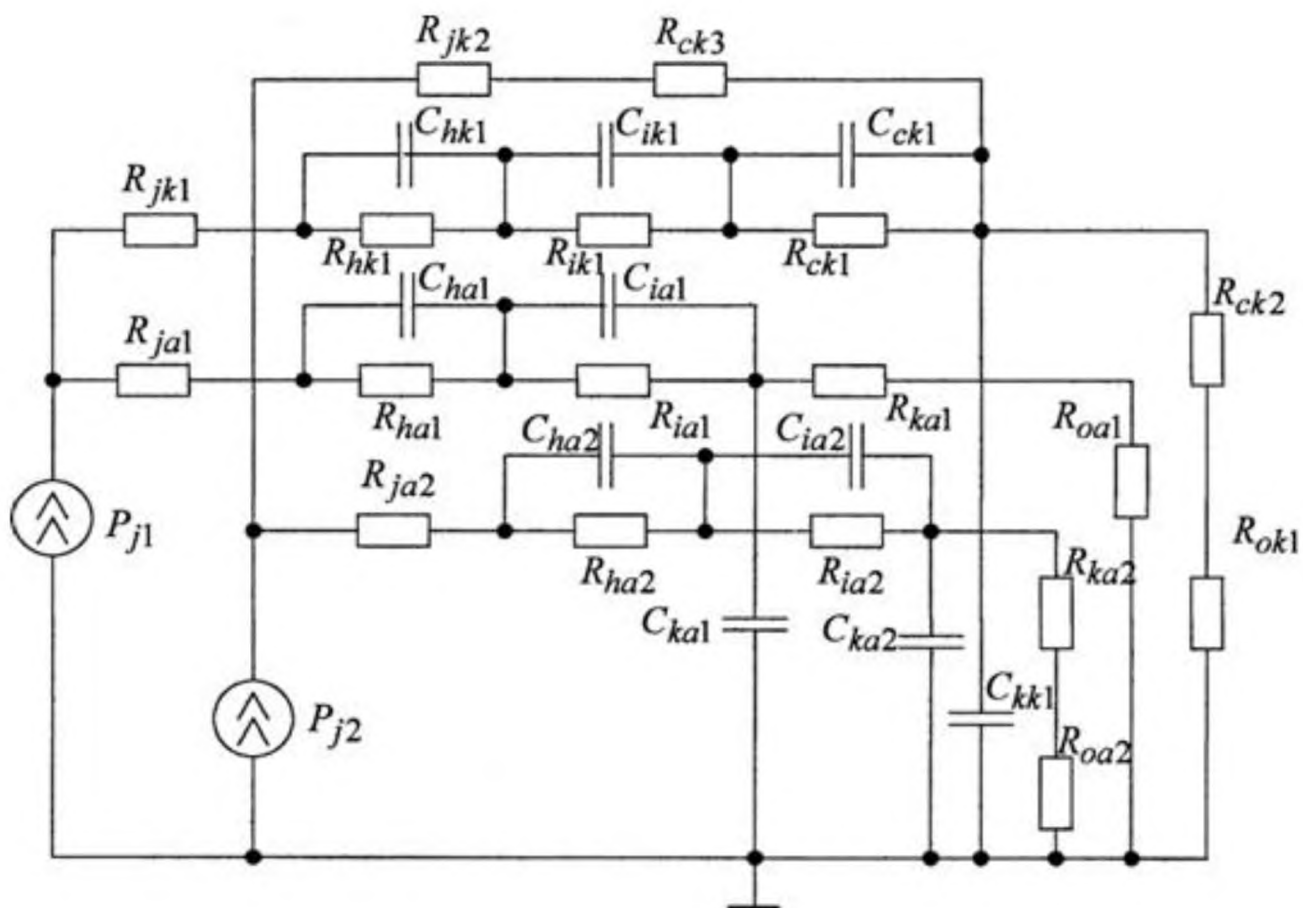
Несиметрична конструкція силових напівпровідникових приладів,
розміщених у герметичному корпусі



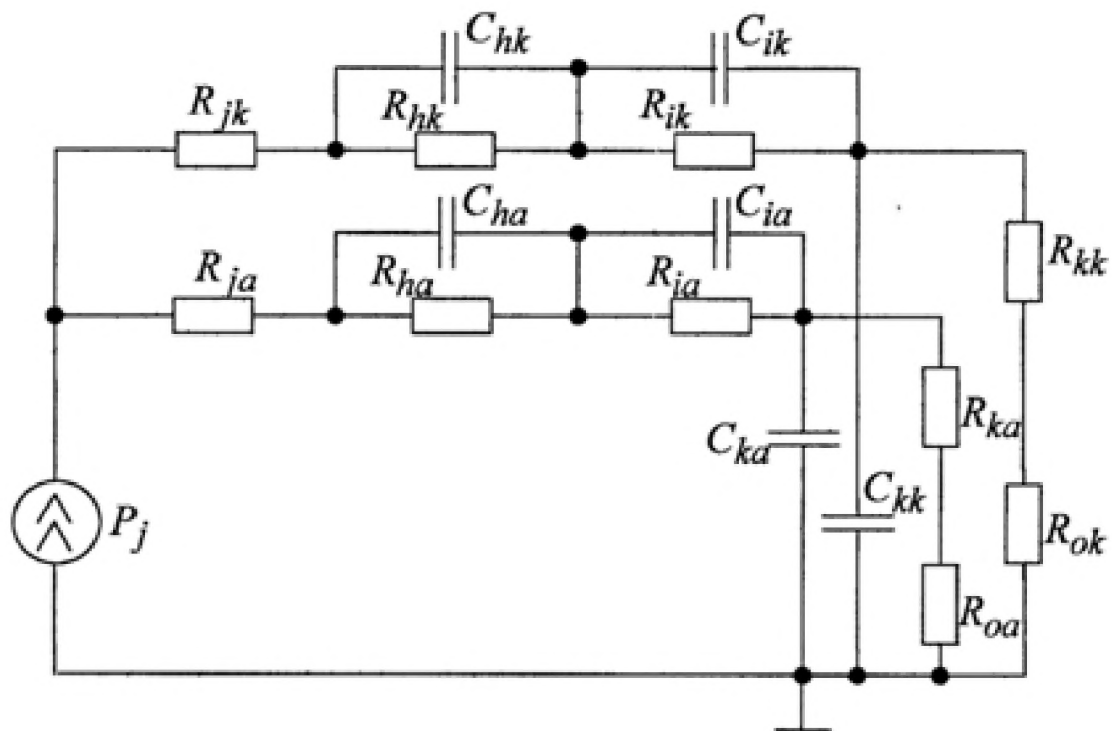
Симетрична конструкція силових напівпровідникових приладів,
розміщених у герметичному корпусі



Несиметрична схема заміщення конструкції КСК



Симетрична схема заміщення конструкції КСК



Матрична система рівнянь

$ X $	P_1	P_2	P_3	P_4	V_{10}	V_{20}	V_{30}	V_{40}			
	1	2	3	4	5	6	7	8		$ B $	
$ A $	1			-1					1	P_{j1}	
	2		-1		1				2	P_{j2}	
	3		$Rt2$			1			3		
	4	$Rt1$					1	1	4		
	5			$Rt3$				1	5		
	6	Δt^*					$-Ct_1/T$		6	$-Ct_1 \cdot V_{C10}/T$	
	7		Δt^*			$\bar{Ct_2}/T$		Ct_2/T	7	$\bar{Ct_{2I}} \cdot V_{C20}/T$	
	8				Δt^*				8	$-Ct_3 \cdot V_{C30}/T$	