

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: «Підвищення енергетичної ефективності роботи тягових
електроприводів шляхом мінімізації втрат потужності у структурі
перетворювача електроенергії»

КНУ.МР.141.25.665-10

Виконав студент ІІ курсу, групи ЕПА-24м /Богдан ЛЕЛЕКА/
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**

ЛЕЛЕКА Богдан Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Підвищення енергетичної ефективності роботи тягових
електроприводів шляхом мінімізації втрат потужності у структурі
перетворювача електроенергії

1. Термін подання студентом роботи: 15 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою підвищення енергетичної
ефективності роботи тягових електроприводів. Завданням є мінімізація
втрат потужності у структурі перетворювача електроенергії.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Види однорідної (одноопераційної) комутації силових ключів в автономних
перетворювачах; II. Двоступінчаста дросельна однорідна комутація ключів з
поліщеними техніко-економічними показниками; III. Мінімізація
конструктивних параметрів дроселя вузла двоступінчастої дросельної
однорідної комутації.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Вузли одноопераційної комутації (ВДОК); II. Базова схема та
принцип комутації; III. Роль снаберних конденсаторів. IV. Конструкція
комутуючого дроселя.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Види однорідної (одноопераційної) комутації силових	10.09.25
2	ключів в автономних перетворювачах	12.09.25
3	Базова напівмостова схема	17.09.25
4	Принцип роботи схеми з комутуючим дроселем	19.10.25
5	Конструкції комутуючих дроселів	24.11.25
6	Аналіз впливу відносних геометричних характеристик	07.12.25
	дроселя на втрати потужності в ньому	
	Аналіз впливу потужності перетворювача на	
	енергетичні характеристики вузла двоступінчастої	

Дата видання завдання 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Богдан ЛЕЛЕКА
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Підвищення енергетичної ефективності роботи тягових електроприводів шляхом мінімізації втрат потужності у структурі перетворювача електроенергії», КНУ.РМ.141.25.665-10

Мета дослідження – підвищення енергетичної ефективності роботи тягових електроприводів шляхом мінімізації втрат потужності у структурі перетворювача електроенергії.

Об'єкт дослідження – перетворювача у структурі тягових електроприводів.

Предмет дослідження – втрати потужності у структурі перетворювача електроенергії тягових електроприводів.

Робота присвячена підвищенню ефективності перетворювальних систем, що використовуються у тягових асинхронних електропередачах вагонів.

Досвід експлуатації автономних тягових перетворювачів на базі швидкодіючих силових модулів IGBT виявив низку істотних недоліків, незважаючи на їхні переваги.

Ці недоліки пов'язані з необхідністю формування комутаційних траєкторій з безпечним рівнем швидкості наростання напруги (du/dt) і струму (di/dt), що призводить до значних комутаційних втрат у модулях IGBT.

Це, у свою чергу, знижує ККД тягових перетворювачів, обмежує робочу частоту та вимагає застосування "важких" вхідних фільтрів.

Крім того, круті фронти вихідної напруги спричиняють прискорене старіння ізоляції тягових двигунів і значне електромагнітне випромінювання.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ,
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ, МІНІМІЗАЦІЯ
ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Види однорідної (одноопераційної) комутації силових ключів в автономних перетворювачах.....	9
Розділ 2. Двоступінчаста дросельна однорідна комутація ключів з поліпшеними техніко-економічними показниками.....	11
2.1. Базова напівмостова схема.....	12
2.2. Принцип роботи схеми з комутуючим дроселем	15
2.3. Конструкції комутуючих дроселів	17
Розділ 3. Мінімізація конструктивних параметрів дроселя вузла двоступінчастої дросельної однорідної комутації.....	20
3.1. Аналіз впливу відносних геометричних характеристик дроселя на втрати потужності в ньому.....	20
3.2. Аналіз впливу потужності перетворювача на енергетичні характеристики вузла двоступінчастої однорідної комутації.....	31
Висновки	35
Список використаних джерел.....	36
Додатки.....	38

Вступ

Досвід експлуатації автономних тягових перетворювачів, створених на базі нових швидкодіючих силових модулів *IGBT*, разом з їхніми незаперечними перевагами виявив ряд істотних недоліків.

Вони пов'язані з необхідністю формування комутаційних траєкторій з безпечним для напівпровідникових ключів рівнем швидкості наростання напруги (du/dt) і струму (di/dt).

Це приводить до того, що в силових модулях *IGBT* автономних тягових перетворювачів, незважаючи на них відносно високу швидкодію, дуже значні комутаційні втрати.

У результаті знижується КПД тягових перетворювачів і обмежується робоча частота [7], що приводить до необхідності застосування „важких” вхідних силових фільтрів.

Крім цього круті фронти вихідної напруги викликають прискорене старіння ізоляції тягових двигунів [8] і значне шкідливе електромагнітне випромінювання.

Застосування додаткових силових вихідних фільтрів, що пропонують фірми-розроблювачі перетворювачів, для рухливого состава не можна вважати найбільш доцільним варіантом розв'язку цієї проблеми.

Щоб виключити зазначені вище недоліки, вигідніше застосовувати схеми тягових перетворювачів з вузлами одноопераційної комутації [9-12].

Такі схеми забезпечують формування фронтів напруги й струму з необхідною крутістю при мінімальних комутаційних втратах.

Як показує аналіз, габаритні розміри, маса й втрати у вузлах двоступінчастої одноопераційної комутації визначаються, у першу чергу, що відповідають параметрами комутуючого дроселя.

Тому для впровадження таких систем необхідно розв'язати наступні завдання:

- визначити найбільш доцільну конструкцію комутуючого дроселя для автономних тягових перетворювачів;
- проаналізувати вплив відносних геометричних характеристик дроселя на зазначені вище його параметри;
- проаналізувати вплив потужності перетворювача на енергетичні характеристики вузла двоступінчастої одноопераційної комутації;
- визначити залежність зміни діючого значення струму вузла комутації від швидкості зміни струму в ньому.

Розділ 1. Види однорідної (одноопераційної) комутації силових ключів в автономних перетворювачах

Комутаційний процес у перетворювачі викликає ряд негативних явищ як у ньому самому, так і в зовнішніх об'єктах.

У даному розділі нас будуть цікавити тих з негативних явищ, які можна усунути або послабити за допомогою одноопераційної комутації, а саме:

- комутаційні втрати енергії в напівпровідникових приладах;
- електромагнітні наведення в навколишнє середовище, які створюють перешкоди пристроям зв'язки й системам керування;
- негативний вплив крутих фронтів напруги на ізоляцію електричних машин.

Перехід до одноопераційної комутації першого або другого роду пов'язаний з генерацією потужності комутації одного знака.

Оскільки потужність комутації підкоряється закону збереження, те цей перехід вимагає наявності генератора потужності комутації протилежного знака.

Залежно від типу цього генератора можна виділити реактивну й роздільну комутацію.

Реактивна комутація використовує як генератор потужності комутації протилежного знака реактивний елемент: дросель або конденсатор. У зв'язку з наявністю наскрізних струмів найбільші проблеми викликає примусове включення силових ключів.

Тому доцільно переходити до одноопераційної комутації другого роду з комутуючим дроселем у якості реактивного елемента (дросельна комутація).

Роздільна комутація використовує як генератор потужності комутації протилежного знака інший комутатор перетворювача, тобто два роди одноопераційної комутації розподіляються між двома комутаторами.

Залежно від способу підключення комутуючого дроселя можна виділити одно- і двоступінчасту дросельну комутацію.

При одноступінчастій комутації дросель підключається ключем основного комутатора (силовим ключем).

Комутація при цьому протікає в один щабель, оскільки комутирують тільки силові ключі.

При двоступінчастій комутації дросель підключається допоміжним ключем [5, 12].

Розділ 2. Двоступінчаста дросельна однорідна комутація ключів з поліпшеними техніко-економічними показниками

Розглянуті вище види дросельної однорідної комутації не дозволяють повною мірою комплексно розв'язати проблему ліквідації викладених недоліків.

Зокрема вони створюють ряд обмежень по діапазону регулювання й характеристикам напівпровідникових приладів.

Розв'язати цю проблему дозволяє схема інвертора із двоступінчастою дросельною однорідною комутацією на базі схеми Мак-Мури з поліпшеними техніко-економічними показниками, яка є досить перспективною для застосування в тягових інверторах асинхронних електропередач вагонов оскільки створює лише невеликі обмеження в регулюючі й інших характеристиках [10].

2.1. Базова напівмостова схема

Аналізована схема фазного модуля мостового інвертора напруги наведена на рис. 2.1, а.

Вузол двоступінчастої однорідної комутації (ВДОК) містить нелінійний комутуючий дросель L_k з вебер-амперною характеристикою, що наближається до зображеної на рис. 2.1,6 і чотириквADRANTНИЙ ключ VS , який виконується на одне - або двоопераційних тиристорах.

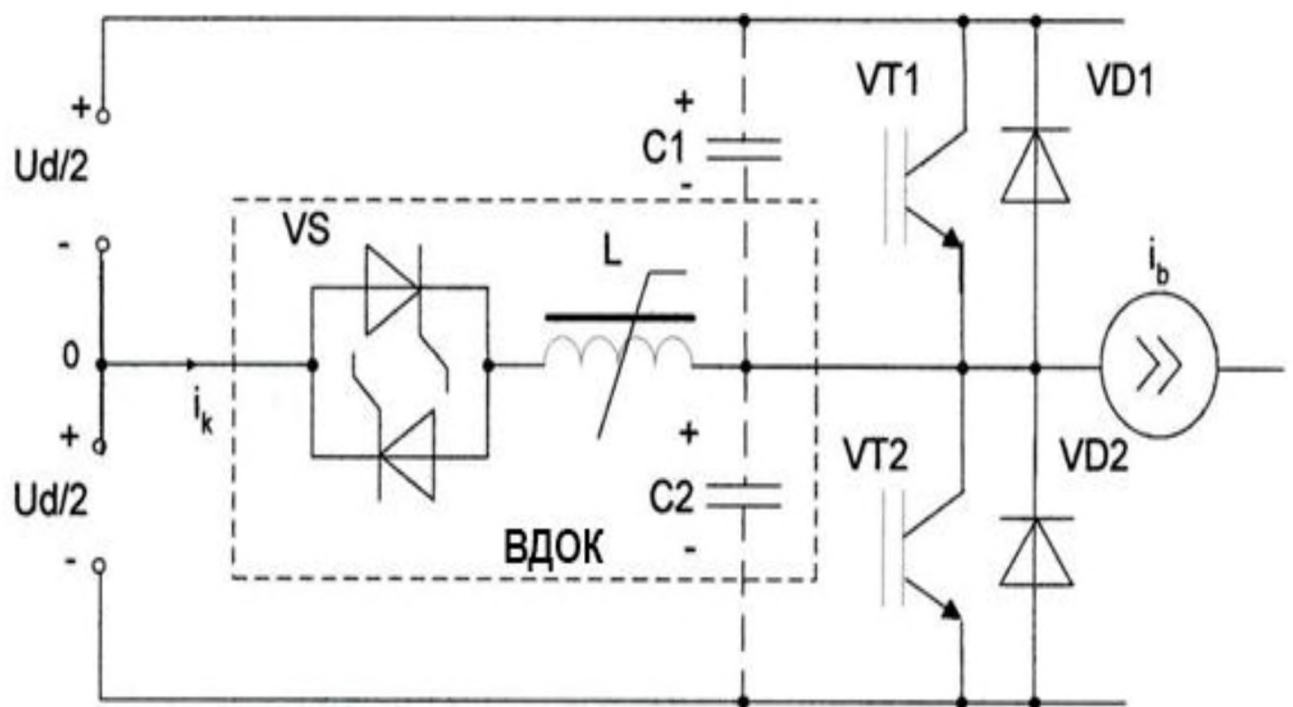


Схема ж мостового багатофазного інвертора з однорідною комутацією складається з однофазних напівмостів, один з яких наведений на рис. 2.1,а. Ключі інвертора комутують із частотою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), тобто чергуються інтервали провідності транзистора й діода в протилежнім плечі.

Щоб одержати характеристику виду рис. 2.1,б, необхідно мати сердечник дроселя з високою магнітною проникністю, частина перетину якого має немагнітний зазор. ВДОК підключається в роботу силової схеми інвертора тільки на короткий інтервал часу незадовго до чергового перемикання ключів.

2.2. Принцип роботи схеми з комутуючим дроселем

Розглянемо спочатку дію схеми, яка не має снабберних конденсаторів $C1, C2$.

Діаграми струму й напруги, які пояснюють дія схеми, наведені на рис. 2.1, в.

Нехай включений силовий діод $VD2$ і необхідно перевести струм на транзистор $VT1$.

Допустимо також, що початкова крапка на вебер-амперній характеристиці перебуває в положенні 0.

При включенні ключа VS до дроселя L прикладається напруга $U_d / 2$ через діод $VD2$.

Дросель затримує наростання струму i_k доти поки робоча крапка не вийде на пологий ділянку характеристики (момент t_1).

Це знижує комутаційні втрати при включенні ключа VS .

Після моменту t_1 струм i_k наростає за лінійним законом, змінюючи в діоді напрямок струму на протилежне й, коли завершується розсмоктування носіїв заряду в діоді, наростання струму i_k закінчується, тому що діод $VD2$ вимикається (момент t_2).

Різницевий струм $i_k - i_e$ переходить до діода $VD1$, що дає можливість включення транзистора $VT1$ при нульовій напрузі на ньому.

Тепер під впливом напруги верхнього джерела $U_d / 2$ починається лінійний спад струму i_k .

При досягненні струмом i_k нуля дросель створює щабель нульового струму $t_3 t_4$, щоб перешкодити протіканню зворотного струму в ключі VS за рахунок його заряду відновлення.

У момент t_4 , якщо ключ VS уже виключений і розсмоктування носіїв заряду в ньому закінчилося, комутаційний процес закінчується й ВДОК від'єднується від комутатора інвертора.

Струм i_e протікає після цього в транзисторі $VT1$.

Таким чином, розглянута схема дозволяє «м'яко» перевести вихідний струм I_y із силового діода на силовий транзистор практично без критичних струмів і комутаційних втрат у силовому транзисторі.

При відсутності ВДОК існував би якийсь час контур короткого замикання: « $U_{d, \text{транзистор } VT1}$, діод $VD2$ ».

2.3. Конструкції комутуючих дроселів

Дроселі вузлів одноступінчастої комутації мають відносно більшу індуктивність і порівняно низьку швидкість зміни струму в обмотках.

Вони використовуються з феритовими сердечниками, які мають немагнітний зазор, і розраховуються по відомих методиках [13].

Суттєво більшими особливостями мають дроселі вузлів двоступінчастої комутації.

Вони працюють в імпульсному режимі при відносно малій величині індуктивності й високої швидкості зміни струму в обмотках.

У роботі [14] виконаний порівняльний аналіз різних конструкцій комутуючих дроселів і показане, що для перетворювачів із твердими вимогами до габаритного обсягу, якими є тягові перетворювачі для рухливого состава, підходять тільки ті конструкції дроселів, у яких магнітне поле не виходить за межі внутрішньої порожнини котушки дроселя.

Цим вимогам задовольняють тороїдальні дроселі й дроселі із замикаючим ярмом.

Оскільки тороїдальні дроселі складні у виготовленні, доцільне застосування дроселів із замикаючим ярмом.

На рис. 2.2 показано одна з можливих конструкцій дроселя із замикаючим ярмом. У її основі котушки К, які намотуються тонкою мідною стрічкою, ширина якої рівняється висоті катушок Л.

На рис. 2.2 поперечні перерізи катушок показані штрихуванням. Стрічкове намотування дозволяє одержати малі втрати від вихрових струмів в обмотці.

Усередині котушок або зовсім немає сердечників, або є тільки тонкі феритові стрижні С, які показані на малюнку пунктиром.

Вони дають вебер-амперну характеристику із щаблем малого струму (рис. 2.1,6), що дозволяє знизити вплив заряду відновлення тиристорних ключів VS ВДОК (див. рис. 2.1,а).

Котушки й стрижні покриваються двома феромагнітними ярмами Я, які мають високу магнітну проникність.

Тоді силові лінії магнітного поля усередині котушок Φ спрямовані майже паралельно широкій стороні стрічки й не викривляються суттєво на торцях, що сприяє зниженню втрат від вихрових струмів у котушках.

Відсутність основного феромагнітного сердечника усередині котушок дозволяє уникнути його насичення імпульсами струму великої амплітуди, що дає можливість одержати меншу масу дроселя в цілому.

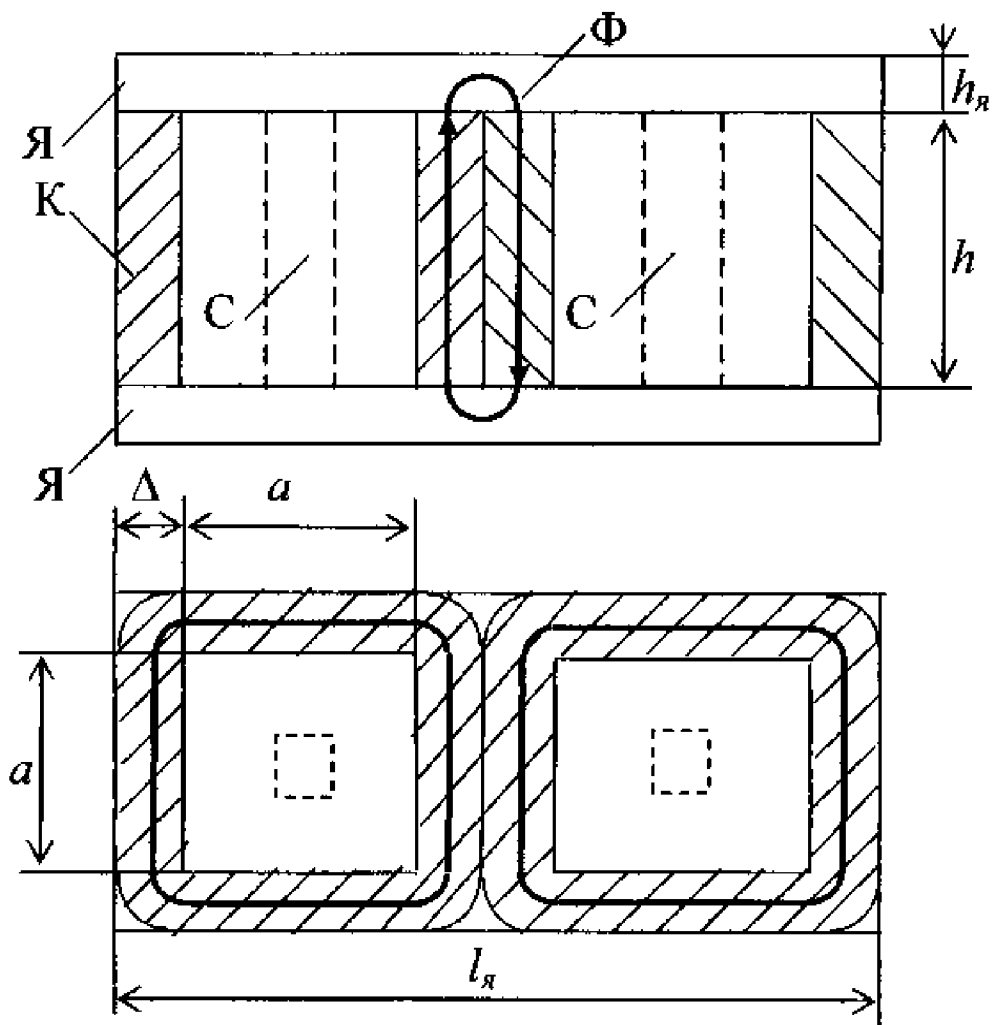


Рис. 2.2. Дросель із замикаючим ярмом

Застосування феромагнітного матеріалу з високою індукцією насичення й немагнітним зазором у принципі дозволяє уникнути насичення, але поблизу зазору відбувається витріщання магнітного потоку, що при стрічковій обмотці допустити не можна.

Ярма доцільно виконувати з матеріалу з високою індукцією насичення, наприклад, з тонких сталевих пластин або стрічки товщиною 0,05 - 0,2 мм.

Розділ 3. Мінімізація конструктивних параметрів дроселя вузла двоступінчастої дросельної однорідної комутації

3.1. Аналіз впливу відносних геометричних характеристик дроселя на втрати потужності в ньому

При визначенні параметрів дроселя доцільно фактичний струм в обмотці замінити еквівалентним синусоїдальні, що створюють у провідниках обмотки такі ж омічні втрати й втрати від вихрових струмів, що й фактичний несинусоїдальний струм [5].

Діюче значення еквівалентного струму дорівнює діючому значенню фактичного струму, а еквівалентна частота визначається рівністю:

$$f_{ei} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Pi_i}{I}, \quad (3.1)$$

де Π_i - діюче значення похідної фактичного струму.

Напруга на обмотці доцільно замінити еквівалентним синусоїдальним за умовами рівності втрат у сердечнику (ярмах).

При цьому діюче значення еквівалентної напруги дорівнює діючому значенню фактичного, а еквівалентна частота й амплітуда еквівалентної синусоїдальної індукції в сердечнику визначаються рівностями:

$$f_{e\text{інд}} = f \left(\frac{K_{\phi i}}{K_{\phi c}} \right)^2,$$

$$B_{me} = B_m \frac{K_{\phi i}}{K_{\phi c}}, \quad (3.2)$$

де f і $K_{\phi i}$ - частота фактичної напруги і його коефіцієнт форми як відношення діючого й середнього значень;

$$K = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \text{ — коефіцієнт форми синусоїди;}$$

B_m - амплітуда фактичної індукції в сердечнику.

Частоти еквівалентного синусоїдального струму й напруги в загальному випадку різні.

Зневажаємо спочатку щаблем малого струму вебер-амперної характеристики, тоді комутуючий дросель заміщається тільки лінійною індуктивністю L .

Для лінійного дроселя формула (3.1) дозволяє одержати зв'язок між діючими значеннями напруги на обмотці й струму в ній:

$$U = Z \cdot I,$$

$$Z = 2\pi \cdot f_{ei} \cdot L, \quad (3.3)$$

де Z - опір дроселя на частоті еквівалентного синусоїдального струму.

Дійсно, зі зв'язку між миттєвими значеннями напруги й струму:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \Pi_i \quad (3.4)$$

Випливає, що та ж зв'язок слушний для діючих значень U і Π_i , після чого підстановкою Π_i з (3.1) одержуємо (3.3).

Зневажимо магнітним опором ярем і приймемо допущення про малість товщини обмоток Δ , що виправдане бажанням одержати помірні втрати від вихрових струмів в обмотках.

Кожну обмотку при цьому можна замінити еквівалентної нескінченно тонкої, яка розташовується на відстані, рівному $1/3$ товщини реальної обмотки від її внутрішнього краю (жирна лінія на нижній проекції рис. 2.2).

Геометричні характеристики представляємо у відносних одиницях, ухвалюючи в якості базисного розмір a внутрішньої порожнини котушки. Відносні величини позначаємо із зірочкою.

Тоді знайдемо:

$$L = \frac{\mu_0 W^2 F_M^*}{2h^*} a,$$

$$F_M^* \cong \left(1 + \frac{2}{3} \Delta^*\right)^2,$$

$$W = \frac{2 \cdot \Delta^* h^* K_k \cdot j}{I} a^2, \quad (3.5)$$

де W - сумарне число витків котушок, які припустимо з'єднані послідовно;

h - висота котушки;

F_M^* - відносне поперечне еквівалентної нескінченно тонкій котушці;

перетин магнітного потоку в

j - щільність струму;

K_K - коефіцієнт заповнення котушки провідниковим матеріалом.

Щільність струму j знаходимо з рівняння теплової рівноваги, що дорівнює фактичні втрати потужності в котушці P_k і потужність, що виділяється у вигляді тепла з її поверхні:

$$P_k = \rho j^2 V_k^* K_k a^3 = \alpha \tau_n \Pi_k^* a^3,$$

$$V_k^* = 2l_b^* \Delta^* h^*,$$

$$i_b^* = 4 + \pi \Delta^*,$$

$$\Pi_k^* = (4 + 2\pi \Delta^*) h^*, \quad (3.6)$$

де $M=V_k$ і Π_k - обсяг і поверхня охолодження котушок;

l_b - середня довжина витка;

ρ - питомий опір провідникового матеріалу;

α - коефіцієнт тепловіддачі;

τ_n - перегрів поверхні котушки.

З формули (3.6):

$$j = \frac{K_j}{\sqrt{a}},$$

$$K = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_k^*}{\rho V_k^* K_k}}. \quad (3.7)$$

Підставляючи у формулу (3.5) L з формули (3.3) і j з формули (3.7), знаходимо базисний розмір:

$$a = K_a \left(\frac{S}{f_{ei} h^*} \right)^{1/4},$$

$$K_a = \left[\frac{1}{4\pi\mu_0 F_M^* (\Delta^* K_k K_j)^2} \right]^{1/4}, \quad (3.8)$$

де $S = UI$ - потужність дроселя.

По знайдений величині базисного розміру легко перебувають інші характеристики котушок.

При визначенні характеристик ярем, приймемо умову змушеного теплового режиму, тобто припустимо, що амплітуда індукції B_m обмежується по насиченню магнітного матеріалу, а не по нагріванню.

Для цього є дві причини:

1) імпульси струму короткі з великою амплітудою, причому однополярні;

2) індукція розподіляється по довжині ярма за законом, близькому до трикутника (рис. 3.1), що при заданім середньому значенні збільшує максимальне значення індукції.

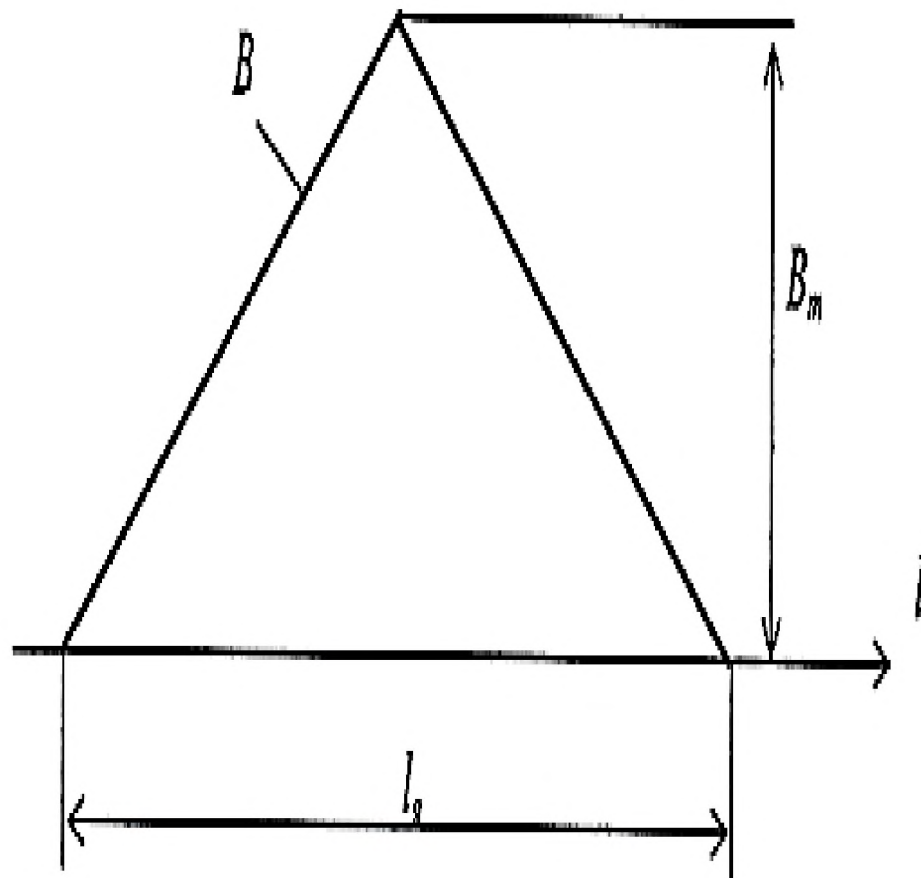


Рис. 3.1. Розподіл індукції по довжині ярма

Максимальне значення індукції в ярмі можна зв'язати з амплітудним значенням потокозчеплення обмоток:

$$\psi_m = U_{cp} \frac{T}{2} = \frac{U}{2K_{\Phi} f} = W B_m F_{\text{я}} K_c,$$

$$F_{\text{я}}^* = h_{\text{я}}^* \left(1 + \frac{2}{3} \Delta^* \right), \quad (3.9)$$

де $U_{cp} = UK_{\Phi}$ — середнє значення напруги на обмотці за період T ;

F та K_c — відносний поперечний переріз ярма й коефіцієнт його заповнення магнітним матеріалом.

З формули (3.9) можна знайти поперечний переріз ярма $F_{\text{я}}$, а потім його висоту $h_{\text{я}}$.

Однак для виконання як цього розрахунків, так і розрахунків параметрів ярма й котушок необхідне завдання двох відносних параметрів: висоти котушки h^* і її товщини Δ^* , певних щодо базисного розміру a .

Від параметра h^* залежить співвідношення між масою котушок і ярем, а також співвідношення між втратами потужності в них.

Можна визначити раціональну величину h^* так, щоб мінімізувати повну масу дроселя або повні втрати потужності в ньому.

Виконаємо визначення раціонального значення h^* для мінімізації втрат потужності.

Існування мінімуму втрат при зміні величини h^* пояснюється в такий спосіб.

Чим менше висота котушки, тем менше довжина силової лінії магнітного поля усередині котушки, тобто менше магнітний опір середовища.

Отже, задана індуктивність забезпечується при меншій числі витків, тобто при меншій масі котушок і менших втратах енергії.

Однак при меншому магнітному опорі росте магнітний потік, який переходячи в ярмо, викликає більші втрати енергії в ньому.

Таким чином, вплив цих двох факторів приводить до можливості виникнення мінімуму втрат при раціональній значенні h^* .

При розрахунках раціонального значення h^* використовуємо методику, наведену в роботі [13], дорівнюючи окремо для котушок і ярм фактичні втрати потужності й потужність, яка знімається у вигляді тепла із зовнішньої поверхні.

За цією методикою можна одержати питомі (на одиницю потужності 5 дроселя) втрати потужності в котушках з формули (3.6), підставляючи P_k :

$$P_k^* = \frac{P_k}{S} = \alpha \tau_n (4 + 2\pi \Delta^*) K_a^2 \sqrt{\frac{h^*}{S f_{ei}}} = K_p \sqrt{h^*}, \quad (3.10)$$

де K_p - коефіцієнт, який не залежить від h^* .

Питомі втрати потужності в ярах визначаємо з вираження:

$$P_{\text{я}}^* = \frac{P_{\text{я}}}{S} = \frac{4K_{\text{н}}\gamma_{\text{с}}K_{\text{с}}B_{\text{те}}^2P_{\text{у}}F_{\text{я}}l_{\text{я}}}{S},$$

$$l_{\text{я}}^* = 1 + 2\Delta^*, \quad (3.11)$$

де $K_{\text{н}}$ - коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу індукції по довжині ярма; при трикутному розподілі $K_{\text{н}} = 1/3$;

$\gamma_{\text{с}}$ - щільність магнітного матеріалу;

$P_{\text{у}}$ - питомі втрати потужності на одиницю маси при синусоїдальній індукції з амплітудою $B_{\text{те}} = I$ Тл і частоті $f_{\text{еі}}$.

Підставляючи $P_{\text{я}}$ з формули (3.9) і $B_{\text{те}}$ з формули (3.2) знайдемо:

$$P_{\text{я}}^* = \frac{K_{\text{н}}\gamma_{\text{с}}B_{\text{т}}^2P_{\text{у}}l_{\text{я}}^*}{4K_{\text{фі}}f_{\text{еі}}K_{\text{к}}\Delta^*K_{\text{ж}}K_{\text{а}}^{1/2}h^{*7/8}} \left(\frac{f_{\text{еі}}}{S} \right)^{1/8} = \frac{K_{\text{ря}}}{h^{*7/8}}, \quad (3.12)$$

де $K_{\text{ря}}$ - коефіцієнт, який не залежить від h^* .

Мінімум сумарних втрат відповідає умові:

$$\frac{dP^*}{dh^*} = \frac{d(P_k^* + P_{\text{я}}^*)}{dh^*} = 0, \quad (3.13)$$

що дає:

$$h_{\text{рац}}^* = \left(\frac{7K_{\text{ря}}}{4K_{\text{р}}} \right)^{8/11},$$

$$P_{\text{min}}^* = 1.93 K_p^{7/11} K_{\text{ря}}^{4/11}. \quad (3.14)$$

3.2. Аналіз впливу потужності перетворювача на енергетичні характеристики вузла двоступінчастої однорідної комутації

Формула (3.14) дає можливість оцінити також вплив потужності на характеристики вузла двоступінчастої однорідної дросельної комутації.

Якщо підставити у формулу (3.14) величини K_p і $K_{рл}$, то знайдемо:

$$P_{min}^* \sim S^{-4/11}, \quad (3.15)$$

де $\sim$ - знак пропорційності.

Таким чином, питомі втрати потужності в дроселі досить суттєво знижуються зі збільшенням потужності перетворювача.

Наприклад, при збільшенні потужності в 100 раз питомі втрати знижуються приблизно в 5 раз.

У теж час втрати в дроселі є головної складової втрат вузла комутації в цілому.

Отже, застосування вузлів одноопераційної дросельної комутації, як засіб зниження комутаційних втрат енергії, особливо ефективно при підвищених потужностях (від десятків кВт і вище).

Від другого відносного параметра Δ^* залежать, насамперед, втрати від вихрових струмів в обмотках.

Ці втрати досить швидко знижуються при зменшенні Δ^* , оскільки зменшується необхідне число витків, а разом з ним і індукція магнітного

поля в обмотці, але при цьому зростають омичні втрати в обмотках, маса й розміри дроселя.

Останні показники можуть погіршуватися також і при занадто великому Δ^* , коли він наближається до одиниці, тому що внутрішні витки зчіплюються при цьому з малою частиною силових ліній магнітного поля й тому використовуються погано.

При первісному розрахунках можна прийняти Δ^* у межах 0,2-0,4, що дає досить гарні показники по омичних втратах і масі дроселя.

Далі необхідно знайти максимально припустиму товщину стрічки за умовою втрат від вихрових струмів:

$$\Delta_{np} = 1,35 \frac{\rho j}{B_{mk} f_{ei}} \sqrt{P_{вх}^*},$$

$$B_{mk} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 I \cdot W}{2 \cdot h}, \quad (3.16)$$

де B_{mk} - амплітуда індукції магнітного поля, створюваної в котушці еквівалентним синусоїдальним струмом I із частотою f_{ei} ;

ρ - питомий електричний опір провідникового матеріалу;

h - щільність струму в провіднику;

$P_{вх}^* = 0,1 - 0,2$ - припустимі відносні втрати від вихрових струмів.

Якщо фактична товщина стрічки більше припустимої й немає можливості її зменшити шляхом розщеплення на ізольовані стрічки меншої товщини, то необхідно зменшити товщину котушки Δ^* і зробити повторний розрахунки для нового A .

Підставляючи у формулу (3.16) величини, що залежать від Δ^* , знайдемо з урахуванням малості Δ^* наближена умова:

$$\Delta_{\text{пр}} \sim \frac{1}{\Delta^*}, \quad (3.17)$$

тобто для підвищення припустимого $\Delta_{\text{пр}}$ необхідно пропорційно знизити товщину котушки Δ^* .

Розрахунки стрижнів, що насичуються, формують щабель малого струму *тривалістю* t_{cm} при включенні й вимиканні вузла комутації, зводиться до застосування рівності:

$$WF_H \Delta B = \frac{U_d}{2} t_{cm}, \quad (3.18)$$

де F_H - поперечний переріз феритового стрижня, що вставляється усередину котушки;

$\Delta B \cong 2B_s$ -збільшення індукції в стрижні на інтервалі щабля малого струму;

B_s — індукція насичення феррита.

Варто відзначити, що після насичення стрижня його магнітна проникність близька до μ_0 , тобто до проникності порожнини усередині котушки.

Тому змінювати розміри дроселя при введенні стрижнів, що насичуються, не потрібно.

Цей факт є одним з переваг комутуючого дроселя, розглянутої конструкції.

Відвід тепла організує шляхом створення теплового контакту між стрижнем і ярмом [5].

Висновки

Мета дослідження – підвищення енергетичної ефективності роботи тягових електроприводів шляхом мінімізації втрат потужності у структурі перетворювача електроенергії.

Об'єкт дослідження – перетворювача у структурі тягових електроприводів.

Предмет дослідження – втрати потужності у структурі перетворювача електроенергії тягових електроприводів.

Робота присвячена підвищенню ефективності перетворювальних систем, що використовуються у тягових асинхронних електропередачах вагонів.

Досвід експлуатації автономних тягових перетворювачів на базі швидкодіючих силових модулів IGBT виявив низку істотних недоліків, незважаючи на їхні переваги.

Ці недоліки пов'язані з необхідністю формування комутаційних траєкторій з безпечним рівнем швидкості наростання напруги (du/dt) і струму (di/dt), що призводить до значних комутаційних втрат у модулях IGBT.

Це, у свою чергу, знижує ККД тягових перетворювачів, обмежує робочу частоту та вимагає застосування "важких" вхідних фільтрів.

Крім того, круті фронти вихідної напруги спричиняють прискорене старіння ізоляції тягових двигунів і значне електромагнітне випромінювання.

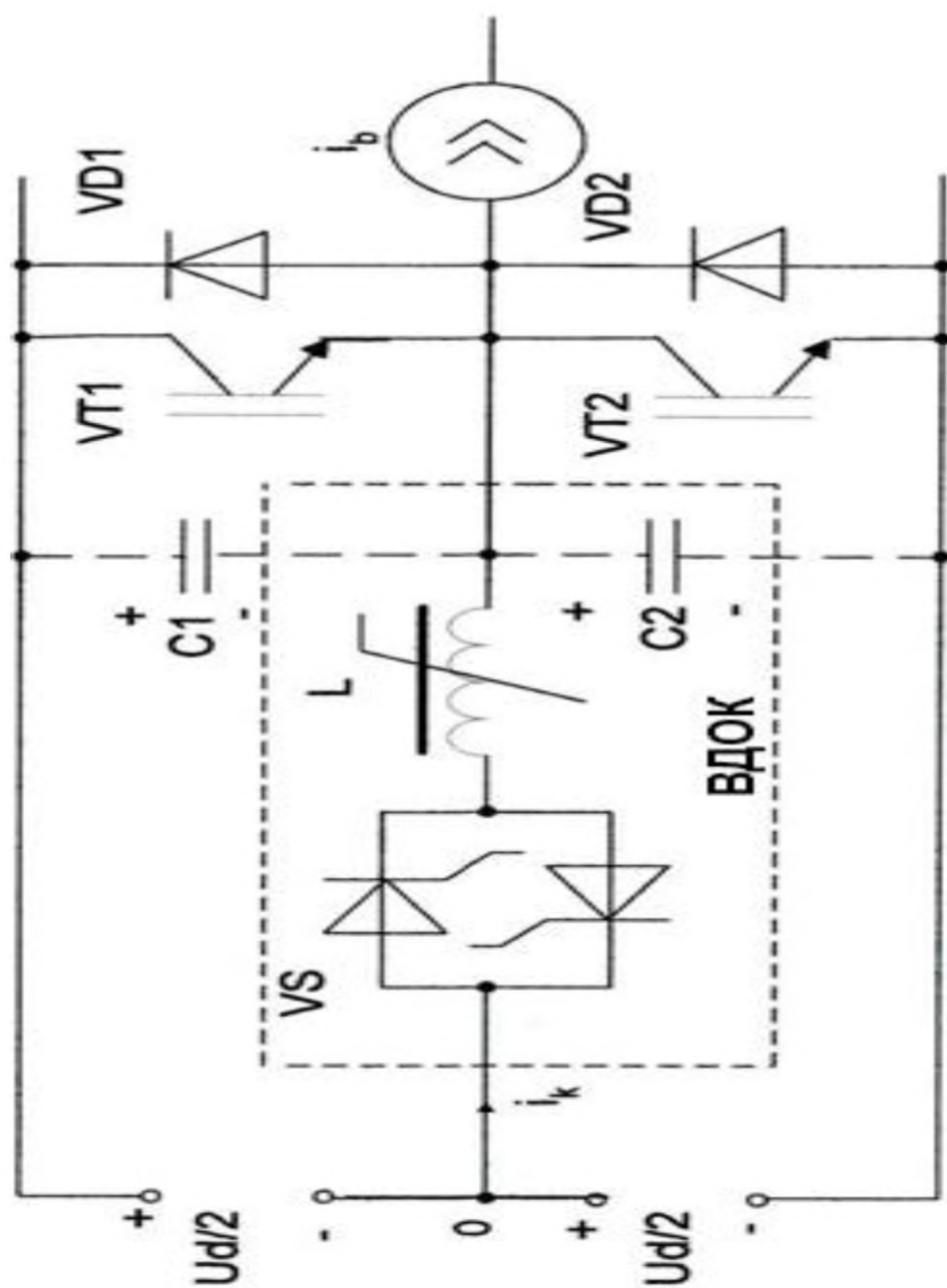
Список використаних джерел

1. Silva L. I., Bouscayrol A., De Angelo C. H., Delarue P. and Verhille J. N. (2014). A Novel Approach for Simulating the Control of the Traction System of an Automatic Subway 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1 – 6.
2. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. (2019). Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 48-57.
3. Kvitka S., Bezmennikova L., Vovk O., Kvitka O. (2013). Control methods and hardware implementation of modern frequency converters. Proceedings of the Tavri State Agro-Technological University. Melitopol. Vol. 3, (2), 164 – 171.
4. Kononov B., Nechaus A., Ryabukha N. (2014) Control system of a frequency-regulated electric drive based on an asynchronous electric motor. Collection of scientific papers of the Kharkiv Air Force University, 3(40), 136-140.
5. Goolak S., Tkachenko V., Št'astniak P., Sapronova S. and Liubarskyi B. (2022) Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. Symmetry, 14, 150.
6. Saidov M., Zhumaev Z., Murodov Kh., Mardonov D. (2020). Study of the effectiveness of the application of the control system of an asynchronous electric drive. Science, technology and education. 62-67.
7. Potapenko E., Dushinova E., Levykina V., Vasilyeva E. (2009). Estimation of rotor resistance using injection for high-precision vector control of an asynchronous drive. Electrical engineering and power engineering, 2, 37 - 42.

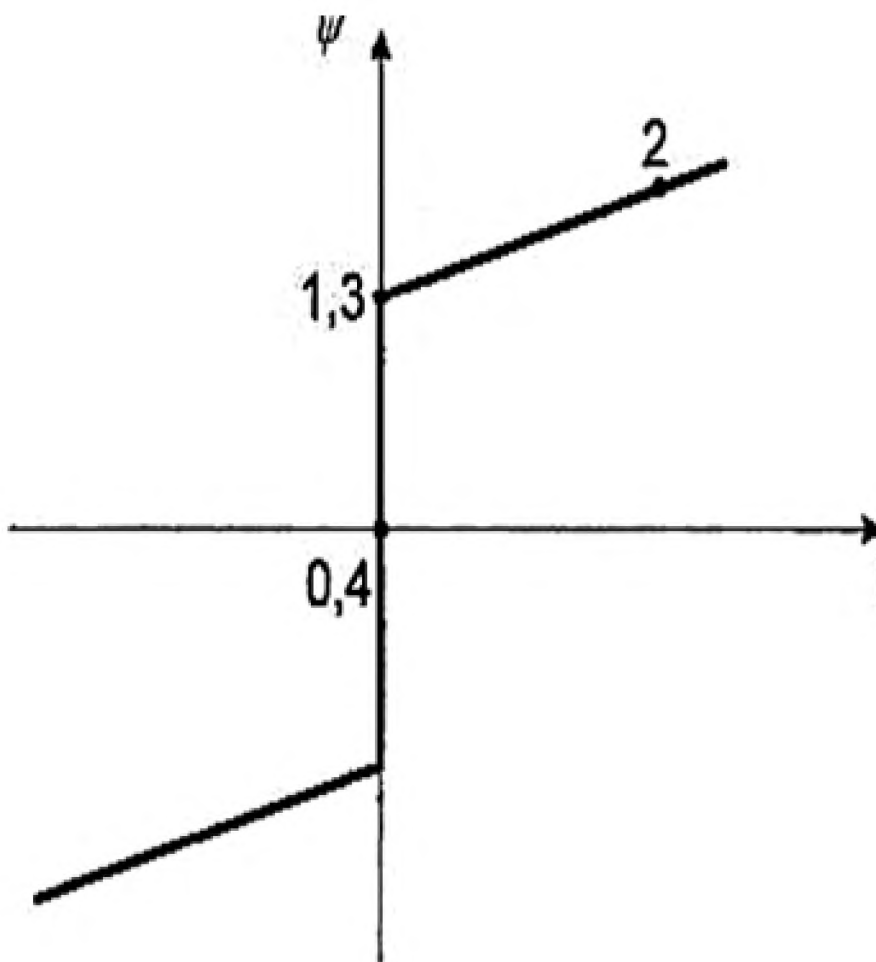
8. Heidari H., Rassõlkin A., Holakooie M. H., (...), Belahcen A., Lukichev D. V. (2020). A parallel estimation system of stator resistance and rotor speed for active disturbance rejection control of six-phase induction motor. *Energies*, 13(5), 1121.
9. Shreiner R., Shilin S., Kostylev A., Khabarov A. (2012). Optimization of a variable-frequency induction motor drive with a scalar control system. *Russian Electrical Engineering*, 83(9), 490 – 493.
10. Panov S., Rubtsov V. (2017). Improvement of scalar control of a frequency-controlled asynchronous electric drive with improved dynamic characteristics. *International scientific journal "Symbol of Science"*, No. 05, 41 – 48.
11. Peresada S., Konoplynskiy M. (2013). Active resistance identification of an induction motor using an adaptive flux observer. *Technical Electrodynamics*, 1, 40 – 48.
12. Braslavskii I., Kostylev A., Tsibanov D., Khabarov A. (2014). Dynamic-process optimization in an asynchronous electric drive with a scalar automatic control system. *Russian Electrical Engineering*, 85(9), 575 – 580.
13. Bevz D., Payuk L., Voronina N. (2016). The Controlled Electric Drive of the Automatic Cooling System of the Engine Room on a Vessel. *MATEC Web of Conferences*, 91, 01037.
14. Vydmysh A., Yaroshenko L. (2020). Basics of an electric drive. Theory and practice. Part 1. Study guide. VNAU, 387.

Додатки

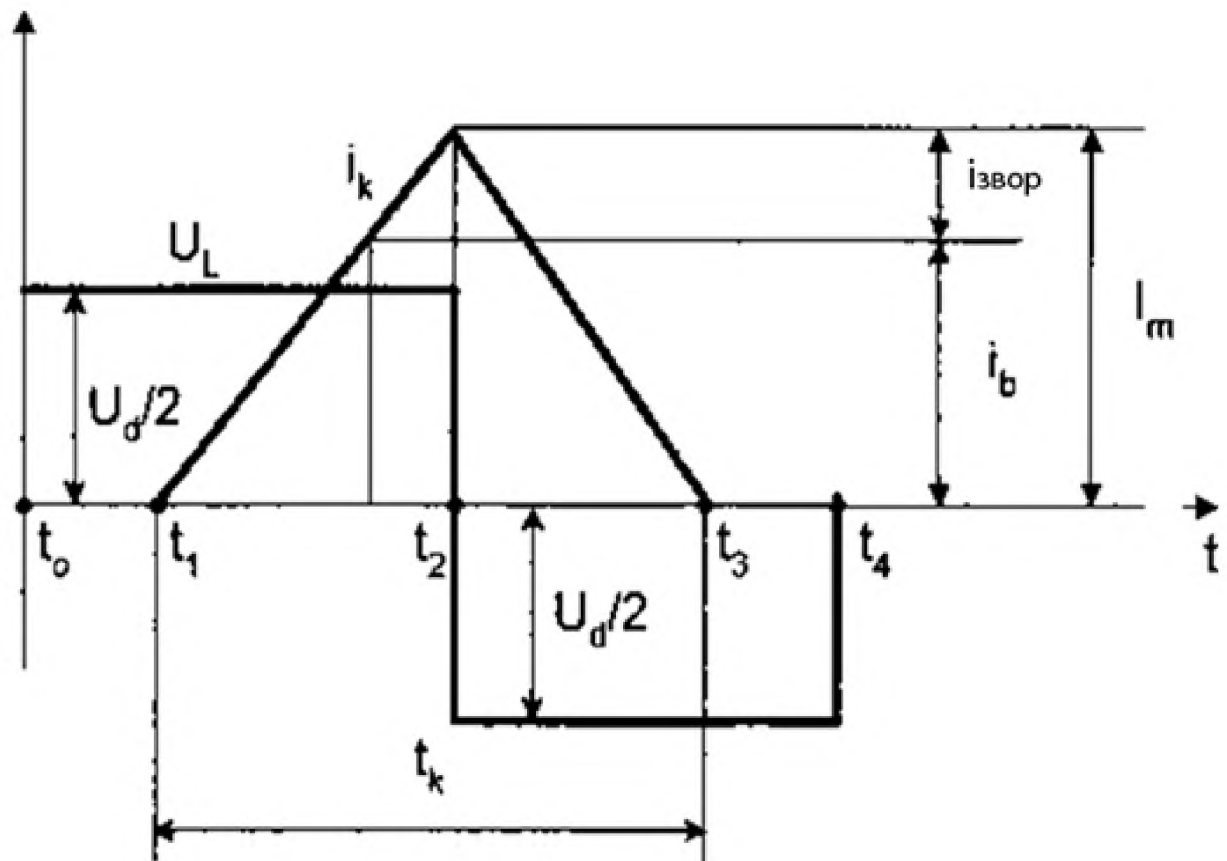
Схема фазного модуля (однофазного напівмоста) із двоступінчастою однорідною комутацією



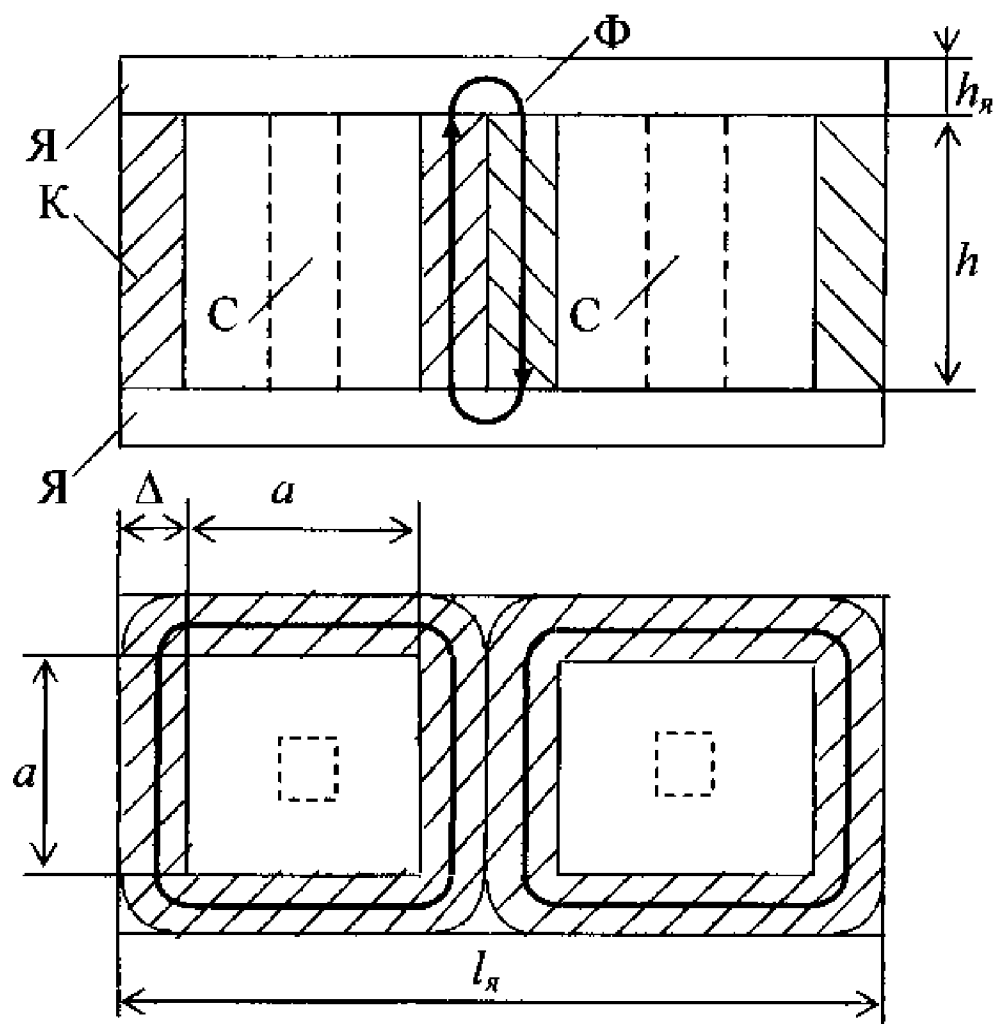
Характеристика фазного модуля (однофазного напівмоста) із
двоступінчастою однорідною комутацією



Робота фазного модуля (однофазного напівмоста) із двоступінчастою однорідною комутацією



Дросель із замикаючим ярмом



Розподіл індукції по довжині ярма

