

УДК 621.311  
DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-80-95

**ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ  
ПРИ ГРАНИЧНОМУ РЕЖИМІ ФУНКЦІОНУВАННЯ**

**О.В. Кочетков**

к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання  
і засобів автоматики»

**В.М. Машін**

старший викладач кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання  
і засобів автоматики»

**С.І. Іовчев**

к.ф.-м.н., доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання  
і засобів автоматики»

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Р.Ю. Харченко**

к.т.н., доцент кафедри «Морського радіозв'язку»

*Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна*

***Анотація.** Проаналізовано принципи та методи дослідження енергетичних параметрів перетворювачів постійної напруги модульної структури з використанням узагальнених математичних моделей для розрахунку діючих значень струмів, потужності втрат і коефіцієнта корисної дії перетворювачів постійної напруги понижуючого типу.*

*Обґрунтовано кілька основних напрямів дослідження енергетичних параметрів понижуючих перетворювачів модульної структури при граничному режимі.*

*Наведено результати досліджень та виявлені особливості параметрів діючих значень струмів, понижуючих перетворювачів постійної напруги при однофазному та багатofазному принципах перетворення з граничним режимом функціонування.*

***Ключові слова:** імпульсних перетворювачів постійної напруги, ККД, перетворювачі постійної напруги, імпульсні перетворювачі модульної структури, коефіцієнт пульсацій.*

UDC 621.311

DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-80-95

**RESULTS OF RESEARCH INDICATORS  
OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY OF DC VOLTAGE CONVERTERS  
IN THE LIMIT MODE FUNCTIONING**

**O. Kochetkov**

PhD, Associate Professor Department of «Operation of ship's electrical equipment and automation»

**V. Mashin**

Senior Lecturers Department of «Operation of ship's electrical equipment and automation»

**S. Iovchev**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor Department of «Operation of ship's electrical equipment and automation»

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**R. Kharchenko**

Ph.D Associate Professor Department of «Maritime Radiocommunications Chair»

*National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The principles and methods for studying the energy parameters of modular-structure DC converters are analyzed using generalized mathematical models for calculating the RMS currents, power losses, and efficiency of step-down DC converters. Several main directions for researching the energy parameters of modular-structure step-down converters under boundary-mode operation are substantiated. The results of these studies are presented, revealing the particular features of the RMS current parameters of step-down DC converters under both single-phase and multi-phase conversion principles with boundary-mode operation.*

**Keywords:** *pulse converters of constant voltage, efficiency, converters of constant voltage, pulse converters of modular structure, ripple coefficient.*

**Вступ.** Перетворювачі постійної напруги – ППН знаходять широке застосування у сучасних системах електроживлення суднових радіотехнічних пристроїв та телекомунікаційного обладнання, забезпечуючи роботу технологічного обладнання на морських підприємствах, об'єктах енергетики, в суднових системах охоронної та пожежної сигналізації тощо [1].

Використання в ППН імпульсного принципу перетворення електричної енергії сприяє покращенню техніко-економічних показників джерел вторинного електроживлення (підвищення енергоефективності, зменшення обсягу та маси тощо).

Модульний принцип побудови імпульсних перетворювачів – з  $N$  однотипних взаємозамінних (модулів) перетворювачів постійної напруги (ППН) – силових каналів (СК) – забезпечує підвищення їх надійності, технологічності та зниження трудомісткості їх виготовлення, підвищення рівня уніфікації та стандартизації, а також сприяє вирішенню питань резервування, адаптації до змін режимів їхньої роботи, економії електроенергії [2].

**Мета роботи** – аналіз методів дослідження енергетичних параметрів перетворювачів електричної енергії модульної структури з однофазним та багатофазним принципами перетворення електричної енергії при граничному режимі функціонування, вибір необхідних напрямків дослідження. Аналіз отриманих результатів дослідження для виявлення шляхів покращення енергетичних параметрів перетворювачів постійної напруги.

**Викладення основного матеріалу.** Реалізація ППН модульної структури (рис. 1) з  $N$  силових каналів СК понижуючого типу (рис. 2) у ряді випадків краще, ніж з СК підвищує та інвертує типів. Перевагою ППН понижуючого типу є забезпечення безрозривного характеру струму в ланцюзі навантаження (Н), що сприяє зменшенню маси та габаритів реактивних елементів фільтрів, що згладжують перетворювачів [4].

Подальша мініатюризація ППН модульної структури досягається переходом від однофазного (ОП) до багатофазного принципу перетворення електричної енергії, коли за допомогою схеми управління (СУ), електричні процеси (струми, напруги) в окремо взятих СК зсуваються рівномірно відносно один одного, на час  $T_p = T/N$ , де  $T$  – період перетворення ППН. Використання таких перетворювачів постійної напруги – БПП (багатофазних імпульсних перетворювачів – рис. 1) дозволяє зменшити розміри фільтрів, що згладжують, збільшити в  $N$  разів частоти змінних складових струмів і напруг в колах підсумовування струмів споживання (КПСС) і навантаження (ППСН), а також характер струмів і в колі споживання, і в колі навантаження при розривному характері струмів окремо взятих СК [1; 4]. На рис.1 наведено структурну схему ППН модульної структури з  $N$  паралельно включених модулів – силових каналів СК1...СК $N$ .

Виконання дроселів (в  $k$ -х силових каналах) у вигляді двох напівобмоток – первинної, з числом витків  $W1_k$  і індуктивністю  $L1_k$  і вторинної –  $W2_k, L2_k$  (в даній роботі вважаємо, що  $W1_k = W1, L1_k = L1$  і  $W2_k = W2, L2_k = L2$ ) та включення їх за автотрансформаторною схемою (рис. 2, б, в) дозволяє знизити втрати потужності, змінити (зменшити або збільшити) напругу на силових комутуючих ключах  $SI_k, VDI_k$  порівняно з традиційним типом силового каналу при використанні дроселя з однією обмоткою (рис. 2, а) [4].

У перетворювачах модульної структури розрізняють синфазне, багатофазне та асинхронне функціонування силових каналів СК (СК1, СК2, ..., СК $N$ ).

При синфазності електричних процесів в окремо взятих модулях (у  $k$ -х силових каналах) ППН часового зсуву  $T_p$  між ними відсутня ( $T_p=0$ ) і в таких перетворювачах – ОП (однофазних імпульсних перетворювачах – рис. 1) реалізується однофазний принцип перетворення електричної енергії.

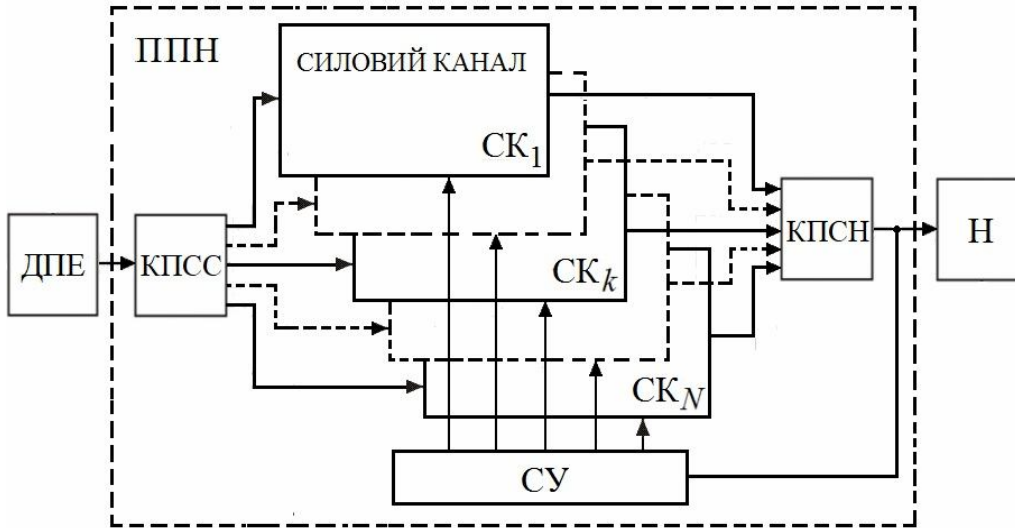


Рис. 1. Структурна схема ППН з ОП (при  $T_p=0$ ) та БП (при  $T_p=T/N$ )

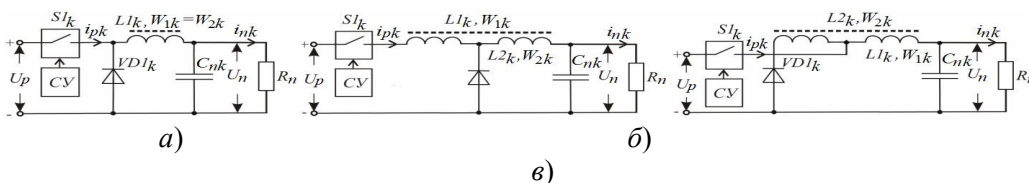


Рис. 2. Схеми силових каналів понижуючого типу з  $n_{21}=1$  (а),  $n_{21}<1$  (б),  $n_{21}>1$  (в)

Підвищення частоти перетворення сприяє покращенню масогабаритних показників ППН. Однак підвищення частоти має обмеження, пов'язані з параметрами елементної бази, і призводить до збільшення частотних втрат, і, як наслідок зниження ККД, збільшення тепловиділення, від величини якого залежать об'єми, як систем охолодження, так і пристроїв в цілому [1].

Вирішення зазначеного протиріччя між масогабаритними та енергетичними показниками імпульсних ППН модульної структури досягається переходом до багатофазного принципу перетворення електроенергії. В цьому випадку один імпульсний процес перетворення електричної енергії розбивається на кілька  $N$  процесів (за кількістю силових каналів), які зсуваються в часі відносно один одного і скуються в загальних колах їхнього протікання [2].

Додатково зменшити енергетичні (динамічні) втрати в ППН дозволяє перехід до граничного режиму роботи, при якому в будь-якому  $k$ -му СК перехід силового комутуючого керованого ключа  $SI_k$  в замкнутий (провідний) стан здійснюється в кожному періоді  $T_k$  в моменти часу, коли струм  $i_{Lk}(t)$  дроселя  $k$ -го СК дорівнює нулю (зниження втрат потужності при перемиканні) [8]. Тому з точки зору енергетичної ефективності процесу перетворення використання граничного режиму функціонування є кращим, як для ОПІ, так і для БПІ.

При проектуванні перетворювачів постійної напруги актуальними є питання підвищення ефективності використання та перетворення електричної енергії, покращення їх навантажувальних та перехідних характеристик та масогабаритних показників. Як відомо [1; 2] ККД та обсяг ППН значною мірою визначаються як геометричними розмірами елементів схеми, так і температурним (тепловим) режимом роботи, тому дослідження та аналіз енергетичних параметрів є актуальним завданням при подальшій мініатюризації перетворювачів постійної напруги.

Однак, на сьогоднішній день енергетичні показники імпульсних перетворювачів модульної структури з силовими каналами - СК понижуючого типу з автотрансформаторним включенням дроселя при граничному режимі функціонування з однофазним і багатofазним принципами перетворення є малодослідженими, що значною мірою стримує широке їх використання.

До енергетичних параметрів відносяться втрати потужності в силових каналах (СК)  $P_{скk}$  перетворювача. Значну величину втрат у СК визначає потужність, що розсіюється в силових комутуючих ключах - керованих  $SI_k$  і некерованих  $VDI_k$ , як яких можуть використовуватися напівпровідникові прилади (польові транзистори та діоди). Втрати потужності в силових комутуючих ключах складаються з втрат, які виникають за час їхнього відкритого стану  $PSI_{kst}$ ,  $PVDI_{kst}$  (статичні втрати) та втрат потужності, що виникають за час перемикань (динамічні втрати потужності)  $PSI_{kdyn}$ ,  $PVDI_{kdyn}$ . Також енергетичні втрати потужності перетворювача визначаються і втратами потужності, що розсіюється на реактивних елементах силових каналів – у дроселях  $P_{Llk}$ , та конденсаторах вхідного та вихідного згладжуючих фільтрів  $PCp_k$ ,  $PCn_k$ . У зв'язку з тим, що в силових каналах використовується два конденсатори згладжуючого фільтра, (один на вході -  $Cp_k$  інший на виході  $Cn_k$ ) то в колах підсумовування струмів споживання і струмів навантаження перетворювача, що складається з  $N$  силових каналів сумарна ємність цих конденсаторів буде дорівнювати відповідно  $Cp = NCp_k$  і  $Cn = NCn_k$  (рис. 3).

Таким чином, зменшення енергетичних втрат потужності, що виникають в елементах силової частини перетворювача (транзисторних  $SI_k$  та діодних  $VDI_k$  силових ключах, дроселях  $LI_k$ , конденсаторах  $Cp_k$ ,  $Cn_k$ ), дозволить підвищити ККД перетворювача в цілому.

У зв'язку з цим можна виділити кілька основних напрямів дослідження залежностей енергетичних параметрів знижувальних перетворювачів модульної структури при граничному режимі перетворення для БПІ та ОПІ:

1) залежність енергетичних параметрів від величини коефіцієнта трансформації ( $n_{21}$ );

2) залежність енергетичних параметрів від величини коефіцієнта накопичення ( $kn$ ) [4; 5];

3) залежність енергетичних параметрів від числа  $N$  силових каналів за однакової потужності  $k$ -х СК ( $Pn_k$ ), при цьому  $Pn = Pn_k N$ ;

4) залежність енергетичних властивостей від числа  $N$  силових каналів при постійній потужності навантаження ППН ( $Pn$ ), коли  $Pn_k = Pn/N$ ;

5) залежність енергетичних параметрів від частоти перетворення.

При цьому для дослідження енергетичних параметрів ППН модульної структури при нарощуванні числа  $N$  силових каналів вважатимемо, що силові ключі  $SI_k$  і  $VDI_k$  та інші елементи – дроселі та конденсатори включаються паралельно один до одного (рис. 1; 2). Для порівняння різних залежностей, отриманих при різному числі  $N$  силових каналів ППН, коли відповідно з різною кількістю елементів ( $L1_k$ ,  $Pn_k$ ,  $Rn_k$ ) та їх параметрами, необхідно зберегти незмінною величину частоти перетворення, щоб, порівнювати за однакових умов.

Автоматизація процесів дослідження та проектування радіотехнічних пристроїв при використанні ЕОМ дозволяє скоротити часові та матеріальні витрати, а також зробити цей процес зручнішим та ефективнішим [6].

Системи автоматизованого проектування (САПР) електронних пристроїв для моделювання процесів в електричних колах, таких як APLAC, DesignLab, System View, Electronic Workbench, Micro-Cap та інші [5] дозволяють створювати та редагувати принципові схеми, розрахувати частотні та часові характеристики, виконувати розрахунок електричних параметрів пристроїв, у тому числі перетворювачів постійної напруги.

Однак, більшість з них досить дорогі і будучи універсальними, як правило, не дозволяють проводити специфічні дослідження (для ППН), наприклад, залежності величини пульсацій у тому числі й залежності у відносному вигляді, таких як коефіцієнти пульсацій, коефіцієнти корисної дії та ін. параметрів, а також забезпечити граничний режим за багатофазного принципу перетворення.

При цьому, для кожного виду дослідження і кожної структури перетворювача (схемотехнічного варіанту), режиму його роботи, необхідно створювати окремий файл з відповідною схемою і параметрами елементів, параметрами сигналів управління. Так, наприклад, щоб побудувати залежність коефіцієнта пульсацій  $K_p$  від коефіцієнта накопичення  $kn$  необхідно для кожного значення залежності з певним кроком ( $kn$ ) зробити вимір величини пульсацій на вході і на виході, потім розрахувати величину коефіцієнта пульсацій. В результаті це призводить до значного збільшення кількості файлів і часових витрат [4].

Тому доцільно для більш ефективного, з точки зору часових витрат дослідження та аналізу перетворювачів при різних режимах роботи створити спеціалізоване програмне забезпечення, що дозволить швидко та зручно проводити необхідні розрахунки для рішення завдань автоматизованого дослідження та проектування ППН.

Розробка алгоритмів та програмних модулів, що дозволяють швидко та зручно, вирішувати завдання дослідження та аналізу ППН, з можливістю врахувати специфіку методів дослідження, є актуальною задачею.

У роботах [1; 2; 5] описано, що в одноканальних перетворювачах (рис. 2), для зменшення змінної складової напруг і струмів на вході і виході як згладжуючі фільтри, використовуються конденсатори  $C_p$  і  $C_n$ . При використанні перетворювачів модульної структури, для зменшення змінної складової напруг і струмів у вхідних і вихідних колах (рис. 1) такого перетворювача також доцільно використовувати згладжуючі фільтри – конденсатори  $C_p$  і  $C_n$ . Однак при використанні багатозафазного принципу перетворення, і у вхідних і вихідних колах БП (рис. 3) частота пульсацій буде більшою, а їхня величина менша, ніж при тих же параметрах в ОП. Тому і величини ємностей конденсаторів, які використовуються як фільтри у вхідних та вихідних колах для БП менше ніж для ОП. Для уніфікації одноканальних перетворювачів (рис. 2), які можуть бути використані і як силові канали перетворювачів модульної структури, використовуваних в них конденсатори  $C_{p_k}$  і  $C_{n_k}$  використовуватимемо з ємністю, розрахованою на забезпечення необхідних рівнів пульсацій при використанні перетворювача, що складається з одного СК. Тоді, при паралельному з'єднанні СК сумарна ємність конденсаторів у вхідних та вихідних колах ППН забезпечуватиме необхідні рівні пульсацій як при ОП, так і при БП. Однак конденсатори однієї й тієї ж ємності і у вхідних та вихідних колах БП забезпечуватимуть кращі показники якості (величина пульсацій, коефіцієнти пульсацій, коефіцієнти згладжування), ніж у ОП [1].

Тому при розрахунках енергетичних параметрів втрати в конденсаторах у вхідних і вихідних колах ППН будуть визначатися з розрахунку, що сумарна ємність конденсаторів  $C_p = NC_{p_k}$  і  $C_n = NC_{n_k}$ , які використовуються в ППН (рис. 3) при ОП та БП однакова.

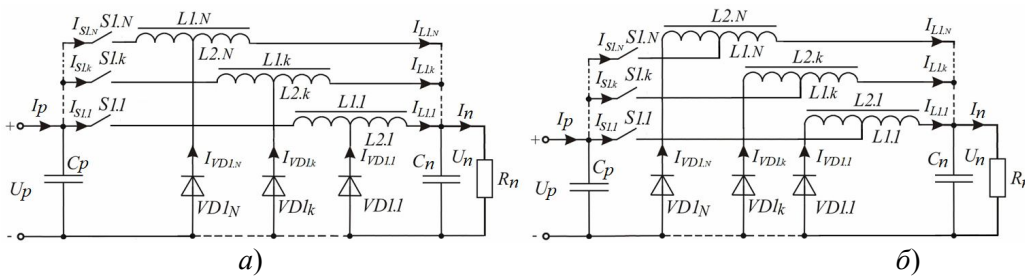


Рис. 3. Структурна схема силової частини ППН модульної структури при коефіцієнтах трансформації:  $n_{21} < 1$  (а),  $n_{21} > 1$  (б)

Одним з основних параметрів перетворювачів електричної енергії є низьке значення втрат при перетворенні, яке можна оцінити за допомогою коефіцієнта корисної дії – ККД. Високе значення ККД призводить до зменшення витрати електричної енергії на роботу електронного обладнання, що живиться від ППН, а також опосередковано призводить до зменшення масогабаритних показників перетворювачів, за рахунок зменшення розмірів охолоджуючих радіаторів силових комутувальних елементів.

Відповідно до [4] величини втрат у перетворювачах залежать:

– від величини діючих струмів в елементах силових каналів – неідеальності силових елементів, а саме наявності активного опору або падіння напруги, призводить до виділення теплової потужності в силових елементах (статичні втрати), пропорційної або діючого значення струму, що протікає (біполярні транзистори, діоди) або квадрату діючого значення струму (дроселі, польові транзистори, конденсатори);

– від величини максимальних значень напруги та струмів у силових комутуючих елементах, від величини яких залежить втрати при перемиканні (динамічні втрати).

Використання автотрансформаторного включення силового дроселя або кількості силових каналів дозволяє змінити величину як максимальних, так і діючих значень напруг і струмів у силових елементах, при цьому величина втрат в окремих елементах силового каналу може збільшитися, так і зменшитися. Таким чином, на практиці можлива ситуація, коли збільшення втрат в одному елементі (наприклад, у діоді) за рахунок зміни коефіцієнта трансформації дроселя може зменшити втрати в інших елементах силового каналу (транзистор, дросель) та збільшити ККД перетворювача в цілому.

Математичні моделі, що дозволяють виконати розрахунки діючих значень струмів, потужності втрат та коефіцієнтів корисної дії, наведені в [2; 5]. Зазначені моделі можна використовувати при розробці спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунку та дослідження енергетичних параметрів ППН. Однак у зазначених математичних моделях різні схемотехнічні рішення ППН та їх режими роботи описані окремими співвідношеннями. Зазначені недоліки суттєво ускладнює розробку алгоритмів розрахунку.

У [4] представлені найбільш підходящі узагальнені математичні моделі, що дозволяють виконувати розрахунки діючих значень струмів елементів основних типів силових каналів ППН (рис. 1) ОПН та БПН при безрозривному, граничному та розривному режимах роботи. Розробка алгоритмів розрахунку для аналізу енергетичних параметрів ППН при використанні запропонованих математичних моделей [4] дозволить виконати необхідні розрахунки для дослідження та проектування ППН. При проведенні дослідження залежностей показників якості від параметрів елементів силових каналів у різних режимах роботи з різним числом  $N$  силових каналів за умови, що ( $Pn_k = \text{const}$ ,  $In_k = \text{const}$ ,  $Rn_k = \text{const}$ ) з такою самою як і в попередньому випадку постійною частотою перетворення, розрахунки необхідно проводити так:

Вихідними даними у разі будуть параметри ППН – вихідна напруга  $Un$ , струм навантаження  $In_k$   $k$ -го СК, число  $N$  силових каналів і індуктивність дроселя  $Ll$ .

Результатами розрахунків будуть:

- Вихідна потужність  $k$ -го СК  $Pn_k = Un \times In_k$ ;
- Вихідна потужність ППН  $Pn = Pn_k \times N$ ;
- Струм навантаження ППН  $In = In_k \times N$ ;
- Опір навантаження  $k$ -го СК  $Rn_k = Un/In_k$ ;



- Опір навантаження ППН  $R_n = U_n / I_n$ ;
- Індуктивність дроселя  $k$ -го СК  $L I_k = L I$ .

При  $P_{n_k} = \text{const}$ : вихідні дані –  $U_n, I_{n_k}$ , а розраховуються –  $P_n = P_{n_k} \times N$ ,  $R_{n_k} = U_n / I_{n_k}$ ,  $L I_k = L I$ ,  $I_n = I_{n_k} \times N$ ,  $R_n = U_n / I_n$ .

З урахуванням викладеного інтерес представлятиме наступний порядок аналізу електричних процесів ППН при  $P_{n_k} = \text{const}$  і при  $P_n = \text{const}$  при нарощуванні  $N$  числа силових каналів.

У випадку ККД перетворювача визначається як

$$\eta = (P_n / P_p) \quad (1)$$

$P_n = U_n \times I_n = I_{n2} \times R_n$  – потужність на виході ППН (потужність навантаження),  $U_n, I_n$  – середні значення напруги і струму навантаження, а вхідна потужність  $P_p$ , що споживається від первинного джерела ППН з  $N$  силових каналів, дорівнюватиме

$$P_{VC} = P_p = (P_n + N P_{chk}) \quad (2)$$

$P_{chk}$  – сумарні втрати потужності в  $k$ -му силовому каналі перетворювача, які визначаються сумою втрат на елементах

$$P_{chk} = (P_{S1kst} + P_{S1kdyn} + P_{VD1kst} + P_{VD1kdyn} + P_{Lk} + P_{Cpk} + P_{Cnk}) \quad (3)$$

ККД  $k$ -го силового каналу перетворювача визначається як

$$\eta_{chk} = P_{nk} / P_{nk} + P_{chk} \quad (4)$$

ККД перетворювача визначається як

$$\eta_{VC} = P_n / P_n + P_{VC} \quad (5)$$

У співвідношеннях, які наведені в [4] враховані величини, що характеризують втрати: на активному опорі  $RL$  обмотки дроселя, і активному опорі  $RC$  конденсатора, значення яких для отримання кращих енергетичних характеристик перетворювачів повинні бути як найменшими. У [4] запропоновані різні співвідношення для розрахунку потужності, що розсіюється елементами силового каналу ППН при розривному та безрозривному режимах роботи. Використовуючи зазначені вирази можна отримати співвідношення для дослідження та аналізу БП.

Енергетичні співвідношення, наведені в [4], характеризуються такими параметрами:  $I_n$  – струм навантаження;  $U_n$  – напруга навантаження;  $U_p$  – напруга живлення;  $L n_k$  – індуктивність дроселя;  $C n_k$  – ємність конденсатора вихідного згладжуючого фільтра;  $k$ -го СК,  $kn$  – коефіцієнт накопичення.

Застосування окремих співвідношень, що описують різні режими роботи та типи силових каналів, викликає складнощі у спільному використанні в одному комплексі програмного забезпечення з узагальненими математичними моделями

електричних процесів. Такий підхід до визначення енергетичних параметрів як окремо взятих  $k$ -х СК, так і в ППН в цілому пов'язаний з необхідністю визначення характеру струму в дроселі перетворювача, розрахунку критичної індуктивності, коефіцієнта накопичення або коефіцієнта передачі за напругою і т.п., що робить розрахунки громіздкими та значно збільшує час обчислень за співвідношеннями, що описують різні режими роботи.

Методика розрахунку втрат потужності (потужності, що розсіюється на елементах схеми СК ППН), полягає у використанні в відомих співвідношеннях [4] для визначення втрат в керованому ключі  $P_{Sl}$ , і некерованому ключі  $P_{VDIk}$ , дроселі  $P_{Lk}$ , конденсаторі  $P_{Cnk}$  таких електричних параметрів струму дроселя),  $I_{max}$  (максимальне значення струму дроселя). Використання  $I_m$ ,  $I_{max}$  в енергетичних співвідношеннях дозволяє їх використовувати в єдиному програмному комплексі при аналізі електричних параметрів ППН. Більш того, такий підхід до визначення потужності втрат на елементах дозволяє спростити алгоритми дослідження енергетичних параметрів ППН, оскільки в  $I_m$ ,  $I_{max}$  вже враховано режим роботи перетворювача, і значення всіх вихідних параметрів ( $Lk$ ,  $f$ ,  $kn$  і т.д.) [4].

Енергетичні параметри перетворювачів модульної структури є функціями, що залежать від коефіцієнта накопичення  $kn$ :  $f(kn)$ ; від відносної напруги живлення ( $U_p/U_n$ ):  $f(\bar{U}_p)$ ; від коефіцієнта трансформації  $n_{21}$ :  $f(n_{21})$ . Точність розрахунку цих функцій залежить від величини інтервалу  $\Delta kn = kn/Mk$  для функції  $f(kn)$ ,  $\Delta \bar{U}_p = \bar{U}_p / M_{\bar{U}_p}$  для функції  $f(\bar{U}_p)$  та  $\Delta n_{21} = n_{21} / M_{n_{21}}$  для функції  $f(n_{21})$ . Число  $Mk$  – це кількість точок, що визначає величину кроку для побудови залежності, наприклад,  $\Delta kn = 1/Mk$  коефіцієнта накопичення (або  $M_{\bar{U}_p} = 10 / M_{\bar{U}_p}$  відносної напруги живлення), або ( $\Delta n_{21} = 2/Mn_{21}$  коефіцієнта трансформації). При організації циклу поточне значення буде визначатися, при  $mk = 1, 2, \dots, Mk$  (або  $m_{\bar{U}_p} = 1, 2, \dots, M_{\bar{U}_p}$ , або  $mn_{21} = 1, 2, \dots, Mn_{21}$ ). При цьому в процесі розрахунку коефіцієнт накопичення  $kn = m_k \Delta kn$  змінюється дискретно з кроком  $\Delta kn$  в інтервалі  $0 \leq kn < 1$ , відносна напруга живлення змінюється дискретно з кроком  $\Delta$  в інтервалі  $1 \leq \bar{U}_p < 10$  і коефіцієнт трансформації змінюється дискретно з кроком  $\Delta n_{21}$  в інтервалі  $0 \leq n_{21} < 2$ .

При використанні математичних моделей [4 і 7] та алгоритмів [6; 9; 10] розроблено програмне забезпечення для дослідження перетворювачів постійної напруги. При використанні зазначеного програмного забезпечення, яке дозволяє проводити розрахунки параметрів електричних процесів та енергетичних показників перетворювачів постійної напруги, отримано залежності енергетичних параметрів (рис. 4, рис. 6).

У  $k$ -му СК діючі значення струмів в обмотках дроселя ( $I_{d \downarrow} Lk$ ) відповідають діючому струму ключа ( $I_{d_{Slk}}$ ), що протікає, на інтервалі накопичення і діючому струму діода  $I_{d_{VDIk}}$  на інтервалі повернення.

Так, як величина діючого значення струму  $i$  є визначальною для величини втрат потужності в елементах силового каналу, то і характер зміни струмів, а, отже, і втрат потужності в елементах (на відповідних інтервалах) буде пропорційний величинам діючих струмів. Для зручності, щоб не прив'язуватися до конкретних значень струмів, у роботі використовуються відносні значення діючих струмів (щодо струмів навантаження). Наприклад, відносні діючі значення струмів ключів  $SI_k$ :  $\bar{I}_{d_{SIk}} = (I_{d_{SIk}} / I_{n_k})$  та  $VDI_k$ :  $\bar{I}_{d_{VD1k}} = (I_{d_{VD1k}} / I_{n_k})$ , (де  $I_{n_k}$  – струм навантаження  $k$ -го силового каналу).

Залежність відносних діючих значень струмів ключа  $SI_k$  і діода  $VDI_k$  показані на рис. 4. Перше дослідження було виконано при фіксованій напрузі навантаження і змінюванні вхідної напруги (вхідна напруга встановлювалася таким чином, щоб при даному коефіцієнті накопичення  $kn$  вихідна напруга залишалася постійною (рис. 4, а). Друге дослідження було виконано при фіксованому співвідношенні напруг на вході та виході перетворювача (рис. 4, б).

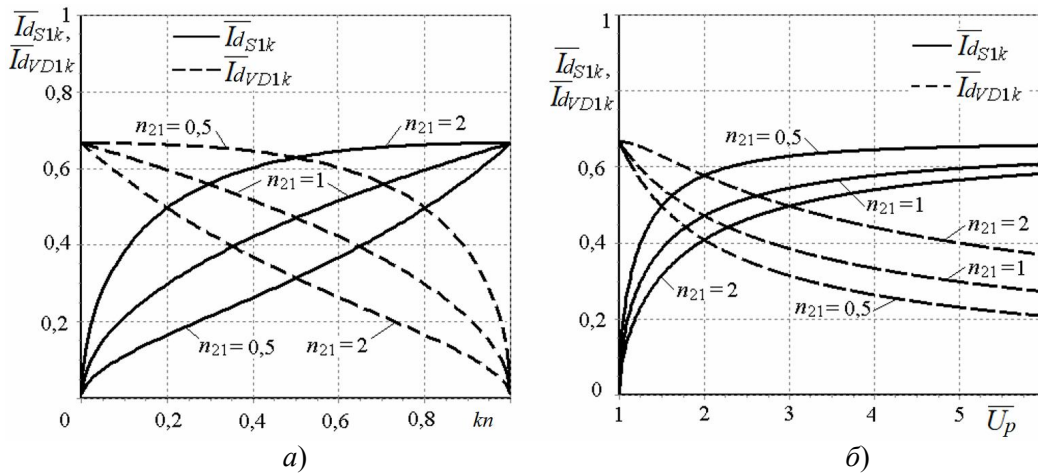


Рис. 4. Залежності діючого значення струмів ключів  $SI_k$  і  $VDI_k$  від  $kn$  (а) і від  $\bar{U}_p$  (б) при різних значеннях  $n_{21}$

Аналіз наведених досліджень показує, що вплив коефіцієнта трансформації дроселя на відносні діючі значення струмів ключів  $SI_k$  ( $\bar{I}_{d_{SIk}}$ ) і  $VDI_k$  ( $\bar{I}_{d_{VDk}}$ ) кількісно і якісно однакові як для фіксованої потужності окремо взятого силового каналу  $Pn_k = \text{const}$  (коли потужність перетворювача пропорційна кількості силових каналів  $Pn = NPn_k$ ), так і для фіксованої потужності перетворювача  $Pn = \text{const}$  (коли потужність силового каналу зворотно пропорційна кількості силових каналів  $Pn_k = Pn / N$ ). З графіків (рис. 4) видно, що шляхом вибору коефіцієнта трансформації дроселя можна збільшити або зменшити відносні діючі струми силових комутуючих елементів. При цьому рівень впливу коефіцієнта трансформації дроселя залежить як від величини коефіцієнта накопичення, так і від величини відносної напруги живлення.

При коефіцієнті накопичення  $kn = 0,5$  та коефіцієнті трансформації дроселя  $n_{21} = 1$  відносний діючий струм ключа  $SI_k$  дорівнює відносному діючому струму діода  $VDI_k$  (рис. 4, а). Це зумовлено рівністю як відносних тривалостей відкритого стану даних силових комутуючих елементів ( $kn = kv$ ) [8], і розмахом їх пульсацій ( $I_{m1} = I_{m2}$ ) (рис. 5, а). Ця особливість роботи силової частини перетворювачів корисна на практиці, оскільки дозволяє застосовувати силові елементи  $SI_k$  і  $VDI_k$  з однаковою настановною потужністю або, коли замість діода  $VDI_k$  використовується польовий транзистор, тих же параметрів, що і  $SI_k$ . Робота перетворювача при іншому значенні  $kn$  призводить до перерозподілу діючих значень струмів силових комутуючих елементів. При збільшенні  $kn$  відносний діючий струм транзисторного ключа  $SI_k$ , збільшується, діодного ключа  $VDI_k$  – зменшується (рис. 4, а). Зменшення  $kn$  призводить до зворотного явища: зменшення відносного діючого струму, транзисторного ключа  $SI_k$  і збільшення відносного діючого струму діодного ключа  $VDI_k$ .

Вибір коефіцієнта трансформації дроселя дозволяє вирівняти відносні значення діючих струмів силових комутуючих елементів. Приміром, при коефіцієнті накопичення  $kn = 0,2$  рівність відносних діючих значень струмів  $I_{\bar{d}}_{SIk} = I_{\bar{d}}_{VDIk}$  настає під час використання дроселя з коефіцієнтом трансформації  $n_{21} = 2$ , а  $kn = 0,8$  – при  $n_{21} = 0,5$  (рис. 5, а). Діаграми струмів дроселя для цих випадків проілюстровано на рис. 5, б, в.

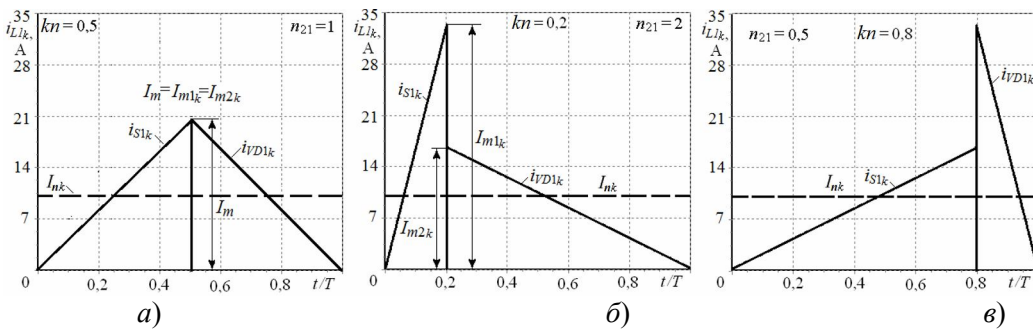


Рис. 5. Часові діаграми миттєвих значень струмів дроселя  $k-20$  СК  $i_{Lk}(t)$  при,  $U_n = const$ ,  $kn_k = 0,5$  і  $n_{21} = 1$  (а),  $kn_k = 0,2$  і  $n_{21} = 2$  (б),  $kn_k = 0,8$  і  $n_{21} = 0,5$  (в)

Залежність відносних діючих струмів ключів  $SI_k$  і  $VDI_k$  від величини коефіцієнта трансформації  $n_{21}$  при різних значеннях відносної напруги живлення  $\bar{U}_p$  представлена на рис. 6.

З графіків видно, що збільшення коефіцієнта трансформації  $n_{21}$  призводить до збільшення відносного діючого струму ключа  $SI_k$ , і зменшення відносного діючого струму діода  $VDI_k$  при будь-яких значеннях відносної напруги живлення  $\bar{U}_p$ .

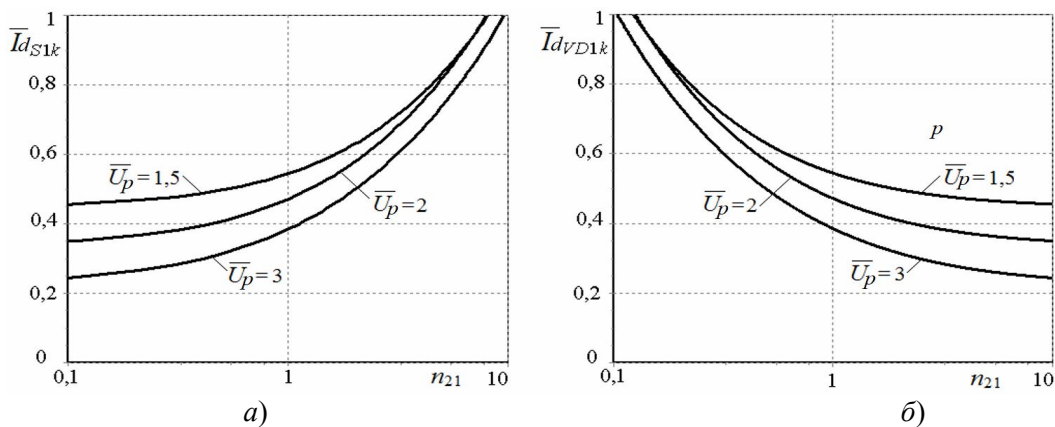


Рис. 6. Залежність діючого значення струмів ключів  $SI_k$  (а) і  $VDI_k$  (б), від  $n_{21}$  при різних значеннях відносної напруги живлення  $\bar{U}_p$

Однак ступінь впливу коефіцієнта трансформації дроселя на величини відносних діючих струмів силових елементів різна. Так, у діапазоні  $1 < n_{21} < 5$  відносно діюче значення струму діода зменшується в 0,75 разів, у той час як відносно діюче значення струму ключа збільшується в 1,5 рази (рис. 6).

Таким чином, здійснити поліпшення енергетичних параметрів ППН можливо за допомогою вирівнювання значень діючих струмів у силових комутуючих елементах. Для вирівнювання значень діючих струмів між силовими комутуючими елементами при співвідношенні напруги живлення та навантаження  $\bar{U}_p > 2$  необхідно використовувати дросель з коефіцієнтом трансформації  $n_{21} > 1$ , при  $\bar{U}_p < 2$ , коефіцієнт трансформації дроселя повинен бути меншим за одиницю  $n_{21} < 1$ . також, що при рівності діючих значень струмів у силових комутуючих елементах відносно значення струму в них становить 50 % від струму навантаження ( $\bar{I}_{d_{S1k}} = \bar{I}_{d_{VD1k}} = 0,5$ ).

**Висновки:** Виділені кілька основних напрямів дослідження енергетичних параметрів понижуючих перетворювачів модульної структури при граничному режимі функціонування для БП та ОПП.

Для дослідження ППН запропоновано математичні моделі та алгоритми, що дозволяють досліджувати та встановлювати вплив параметрів елементів на характер енергетичних процесів силової частини.

Наведено результати досліджень діючих значень струмів, що знижує ППН при однофазному та багатофазному принципах перетворення з граничним режимом функціонування, отримані під час використання спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого з урахуванням запропонованої математичної моделі [4, 6-10]. Показано, що здійснити поліпшення енергетичних параметрів ППН можливо за допомогою вирівнювання значень діючих струмів в силових комутуючих елементах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кочетков О.В., Машін В.М., Гаур Т.О., Вітюк М.В., Харченко Р.Ю. Результати дослідження показників якості електричної енергії перетворювачів постійної напруги при граничному режимі функціонування. Вісник Одеського національного морського університету, 2023, № 2 (69), С. 64-74.
2. Andreev A., Kochetkov A., Kupratsevich A. Increasing of order astatism in amplifiers of D class with combined control. In: Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference (TCSET 2006), 2006, P. 534.
3. Kharchenko R.Yu., Zavadskiy V.A., Kochetkov A.V. Methods for automated research of DC voltage converters. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22.11.2022–23.11.2022, Одеса: НУ «ОМА», 2023, С. 85-89. (in Ukrainian)
4. Гунченко Ю.О. Електричні параметри модульних перетворювачів постійної напруги з гранично-розривним режимом функціонування при неідентичності індуктивностей силових каналів. Інформатика та математичні методи в моделюванні, 2012, С. 143.
5. Малявін І.П. Методика автоматизованого проектування багатофазних імпульсних перетворювачів постійної напруги. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2015, № 2, С. 84-88.
6. Kochetkov O.V. Methods for automated research of DC voltage converters. Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2024), Odesa, Ukraine, May 15, 2024: Proceedings, Odesa Military Academy, 2024, P. 39-40.
7. Харченко Р.Ю., Кочетков О.В., Гаур Т.О. Електричні процеси підвищуючих перетворювачів постійної напруги модульної структури в граничному режимі функціонування. Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22.11.2023-23.11.2023, Одеса: НУ ОМА, 2023, С. 108-110.
8. Кочетков О.В., Зарицька О.І., Гаур Т.О. Дослідження впливу величини вхідної напруги на показники якості електричної енергії перетворювачів постійної напруги модульної структури. Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22.11.2023–23.11.2023, Одеса: НУ ОМА, 2023, С. 104-107.
9. Малявін І.П. Математична модель електричних процесів багатофазних імпульсних перетворювачів постійної напруги при безрозривних струмах дроселів силових каналів. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 23.11.2021-24.11.2021, Одеса: НУ ОМА, 2021, С. 51-54.

10. Kharchenko R. Y., Kochetkov A. V., Mikhaylenko V. S. Analysis of methods for automated research of DC voltage converters of modular structure. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022, № 3, P. 7-21.

#### REFERENCES

1. Kochetkov O.V., Mashin V.M., Gaur T.O., Vitiuk M.V., & Kharchenko R.Yu. (2023). Rezultaty doslidzhennia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy pry hranichnomu rezhymi funktsionu-vannia [Results of the study of the quality indicators of electrical energy of DC converters in the boundary operating mode]. *Visnyk Odeskoho natsional-noho morskoho universytetu*, vol. 2(69), pp. 64–74. (in Ukrainian)
2. Andreev A., Kochetkov A., & Kupratsevich A. (2006). Increasing of order astatism in amplifiers of D class with combined control. In: *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference (TCSET 2006)*, P. 534.
3. Kharchenko R.Yu., Zavadskiy V.A., & Kochetkov A.V. (2023). Methods for automated research of DC voltage converters. In: *Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka»*. Odesa: NU «OMA», P. 85-89 (in Ukrainian)
4. Gunchenko Yu.O. (2012). Elektrychni parametry modulnykh peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy z hranichno-rozryvnyim rezhymom funktsionuvannia pry neidentychnosti induktyvnosti sylovykh kanaliv. *Informatyka ta matematychni metody v modelyuvanni* [Electrical parameters of modular DC converters with boundary-discontinuous mode under non-identity of the inductances of power channels. *Informatics and Mathematical Methods in Modeling*]. 143 p. (in Ukrainian)
5. Maliavin I.P. (2015). *Metodyka avtomatyzovanoho proektuvannia bahatofaznykh impulsnykh peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy* [Technique of automated design of multiphase DC converters]. *Vymiriuvalna ta obchysliualna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, vol. 2, P. 84-88. (in Ukrainian)
6. Kochetkov O.V. (2024). Methods for automated research of DC voltage converters. In: *Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2024)*, Odesa, Ukraine, May 15, 2024: *Proceedings Odesa Military Academy*, vol. 3(2022), P. 39-40.
7. Kharchenko R.Yu., Kochetkov O.V., & Gaur T.O. (2023). Elektrychni protsesy pidvyschchuiuchykh peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy modulnoi struktury v hranichnomu rezhymi funktsionuvannia [Electrical processes of boost DC converters of modular structure in boundary-mode operation]. In: *Materialy XIII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka»*. Odesa: NU OMA, P. 108-110. (in Ukrainian)

8. Kochetkov O.V., Zarytska O.I., & Gaur T.O. (2023). Doslidzhennia vplyvu velychyny vkhidnoi napruhy na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy modulnoi struktury [Investigation of the influence of input voltage magnitude on the power quality indicators of modular DC converters]. In: Materialy XIII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka». Odesa: NU OMA, P. 104-107. (in Ukrainian).
9. Maliavin I.P. (2021). Matematychna model elektrychnykh protsesiv bahatofaznykh impulsnykh peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy pry bezrozryvnykh strumakh droseliv sylovykh kanaliv [Mathematical model of electrical processes in multiphase DC converters under continuous inductor currents in power channels]. In: Materialy XI mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka». Odesa: NU OMA, P. 51-54. (in Ukrainian)
10. Kharchenko R.Y., Kochetkov A.V., & Mikhaylenko V.S. (2022). Analysis of methods for automated research of DC voltage converters of modular structure. Radio Electronics, Computer Science, Control, vol.3, P. 7-21.

*Стаття надійшла до редакції 12.12.2024*

**Посилання на статтю: Кочетков О.В., Машін В.М., Іовчев С.І., Харченко Р.Ю.**

Енергетичні параметри перетворювачів постійної напруги модульної структури при граничному режимі функціонування // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*, 2025. № 1 (75). С. 80-95. DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-80-95.

*Article received 12.12.2024*

**Reference a journal artic: Kochetkov O., Mashin V., Iovchev S., Kharchenko R.**

Results of research indicators of electrical energy quality of dc voltage converters in the limit mode functioning // *Herald of the Odesa National Maritime University: Coll. scient. works*, 2025. № 1 (75). P. 80-95. DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-80-95.