

УДК 621.311
DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-97-112

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

О.В. Кочетков

к.т.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика,
фізика, експлуатація електрообладнання»

В.М. Машін

старший викладач кафедри «Суднова електроенергетика,
фізика, експлуатація електрообладнання»

С.М. Дранчук

к.т.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика,
фізика, експлуатація електрообладнання»

В.І. Цацко

к.ф.-м.н., старший викладач «Суднова електроенергетика,
фізика, експлуатація електрообладнання»

А.В. Єрпельова

к.ф.-м.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика,
фізика, експлуатація електрообладнання»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У роботі виконано комплексне дослідження електричних процесів у перетворювачах модульної структури з силовими каналами понижуючого типу, що реалізують автотрансформаторне включення дроселя в умовах граничного режиму функціонування. Розглянуто особливості формування струмів і напруг у модулях перетворення та визначено ключові закономірності їх динаміки на межі між безперервним і переривчастим режимами струму.

Проведено порівняльний аналіз характеристик однофазних та багатофазних схем перетворення електричної енергії. Особливу увагу приділено впливу фазності, конфігурації модулів, коефіцієнта трансформації дроселя та взаємодії силових каналів на енергетичні показники системи. Досліджено зміну параметрів вихідної потужності, розмахів пульсацій, форм струмів і напруг, а також роль індуктивностей напівобмоток у забезпеченні стабільності та ефективності роботи перетворювачів. На основі математичного моделювання встановлено оптимальні діапазони параметрів, що забезпечують підвищення енергоефективності, зменшення пульсацій вихідних величин і покращення характеристик перетворювачів у режимах граничного навантаження.

© Кочетков О.В., Машін В.М., Дранчук С.М., Цацко В.І., Єрпельова А.В., 2025

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні високопродуктивних модульних силових перетворювачів та багатофазних систем електроживлення нового покоління.

Ключові слова: модульні перетворювачі електроенергії, силовий канал понижуючого типу, автотрансформаторне включення дроселя, однофазне перетворення, багатофазне перетворення, зменшення пульсацій струму, енергоефективність.

UDC 621.311

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-97-112

**INCREASING THE EFFICIENCY
OF SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS
USING PULSE ELECTRIC ENERGY CONVERTERS**

O. Kochetkov

PhD, Associate Professor Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

V. Mashin

Senior Lecturer Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

S. Dranchuk

PhD, Associate Professor Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

V. Tsatsko

Ph.D, Senior Lecturer Department «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

A. Yerpelova

PhD, Associate Professor Department «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment »

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *A comprehensive study of electrical processes in modular-structure converters with step-down power channels implementing an autotransformer inductor configuration under boundary (critical) operating conditions has been carried out. The specific features of current and voltage formation in the conversion modules are examined, and key patterns of their dynamics at the transition between continuous and discontinuous current modes are identified.*

A comparative analysis of single-phase and multiphase power conversion schemes has been performed. Special attention is given to the influence of phase-shifting, module configuration, transformer ratio of the inductor, and interaction between power channels on the overall energy performance of the system. Variations in output power, ripple amplitude, and current and voltage waveforms are investigated, as well as the role

of primary and secondary inductances in ensuring the stability and efficiency of converter operation. Based on mathematical modeling, optimal parameter ranges have been established that improve energy efficiency, reduce output ripple, and enhance converter performance under boundary load conditions. The obtained results may be applied to the design of high-performance modular power converters and next-generation multiphase power supply systems.

Keywords: *modular power converters, step-down power channel, autotransformer inductor connection, single-phase conversion, multiphase conversion, current ripple reduction, energy efficiency.*

Вступ. Навігаційне, телекомунікаційне та комп'ютерне суднове обладнання потребує у процесі свого функціонування надійного та якісного електроживлення. Для підвищення надійності систем електроживлення, їх масштабування, резервування, а також можливості здійснення «гарячої» заміни модулів (блоків), що вийшли з ладу, широко використовується модульний принцип побудови на рівні окремих елементів, пристроїв і систем електроживлення. При цьому основні елементи – випрямлячі, перетворювачі, інвертори, електроживлення можуть виконуватися у вигляді уніфікованих модулів.

Перетворювачі постійної напруги (ППН) модульної структури з однофазним та багатфазним принципами перетворення та регулювання електричної енергії знаходять широке використання у сучасних системах електроживлення. Використання імпульсного принципу перетворення та регулювання електричної енергії забезпечує підвищення ефективності та надійності, зниження маси та габаритів пристроїв електроживлення суднових електронних систем [1; 2; 3].

Однак відсутність результатів досліджень імпульсних перетворювачів модульної структури з силовими каналами – СК понижуючого типу з автотрансформаторним включенням дроселя з граничним режимом функціонування з однофазним та багатфазним принципами перетворення стримує широке їх використання на практиці.

Мета роботи. Аналіз результатів дослідження електричних процесів імпульсних перетворювачів модульної структури з силовими каналами понижуючого типу з автотрансформаторним включенням дроселя з граничним режимом функціонування з однофазним та багатфазним принципами перетворення електричної енергії для підвищення їх ефективності у складі суднових електроенергетичних систем.

Викладення основного матеріалу. Реалізація модульних ППН (рис. 1) з N силових каналів СК понижуючого типу (рис. 2) у ряді випадків краще, ніж з силовими каналами СК підвищуючого та інвертуючого типів. Перевагою ППН понижуючого типу є забезпечення безрозривного характеру струму в ланцюзі навантаження (Н), що сприяє зменшенню маси та габаритів реактивних елементів згладжуючих фільтрів перетворювача [3]. ДПЕ – джерело первинного електроживлення.

У перетворювачах модульної структури розрізняють синфазне, багатфазне та асинхронне функціонування силових каналів СК ($СК_1$, $СК_2$, ..., $СК_N$) [4].

При синфазності електричних процесів в окремо взятих модулях (в k -х СК) ППН часовий зсув T_{Π} між ними відсутній ($T_{\Pi}=0$) і в таких ОП (однофазних імпульсних перетворювачах – рис. 1, а) реалізується однофазний принцип перетворення електричної енергії.

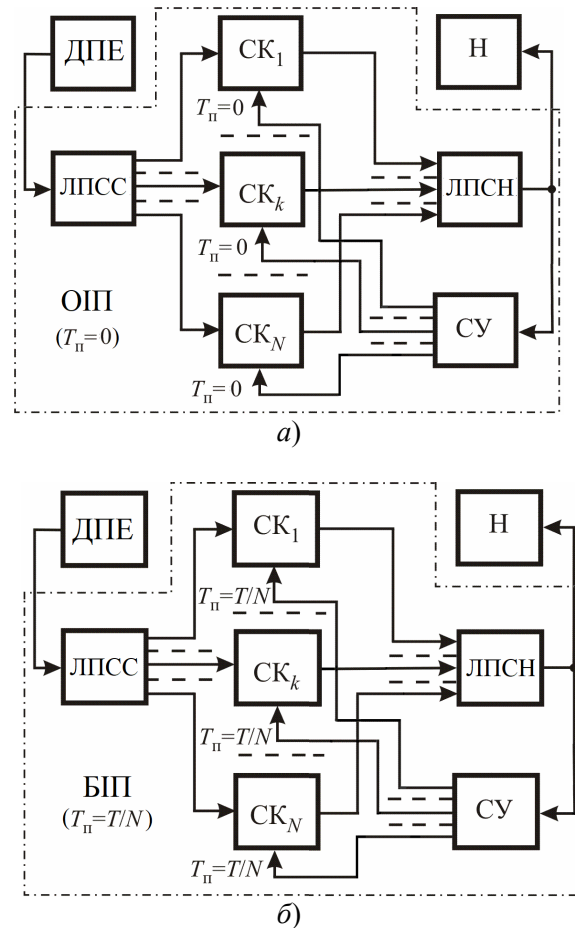


Рис. 1. Структурні схеми ППН модульної структури з однофазним (а) та багатозфазним (б) принципами перетворення

Подальша мініатюризація ППН модульної структури досягається переходом до багатозфазного принципу перетворення електричної енергії, коли електричні процеси (струми, напруги) в окремо взятих СК зсуваються рівномірно один відносно одного на час $T_{\Pi}=T/N$, де T – період перетворення ППН. Використання таких перетворювачів постійної напруги – БП (багатозфазних імпульсних перетворювачів – рис. 1, б) дозволяє зменшити розміри згладжуючих фільтрів, збільшити в N раз частоти змінних складових струмів і напруг в колах підсумо-

вування струмів споживання (ЛПСС) і навантаження (ЛПЧН) при розривному характері струмів окремо взятих СК [1; 2]. Виконання дроселів (в k -Х силових каналах) у вигляді двох напівобмоток – первинної, з числом витків W_{1k} і індуктивністю L_{1k} і вторинної – W_{2k} , L_{2k} , (в даній роботі вважаємо, що $W_{1k} = W_1$, $L_{1k} = L_1$ і $W_{2k} = W_2$, $L_{2k} = L_2$) і $L_{2k} = L_2$. б, в), така схемотехнічна реалізація дозволяє знизити втрати потужності, змінити (зменшити або збільшити) напругу на силових комутувальних ключах S_{1k} , VD_{1k} порівняно з традиційним типом силового каналу з однообмотковим дроселем (рис. 2, а) [3; 5]. Таке автотрансформаторне включення дроселя також дозволяє «розтягнути» діапазон регулювання.

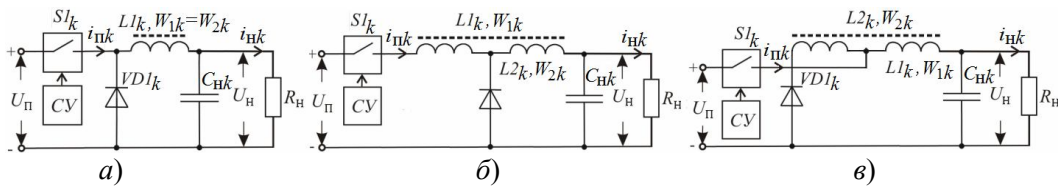


Рис. 2. Схеми силових каналів понижуючого типу
з $n_{21} = 1$ (а), $n_{21} < 1$ (б), $n_{21} > 1$ (в)

Додатково зменшити енергетичні (динамічні) втрати в ППН дозволяє перехід до граничного режиму роботи, при якому перехід силового комутувального ключа S_{1k} в замкнений – провідний стан здійснюється в кожному періоді T_k в моменти часу, коли струм $i_{Lk}(t)$ дроселя k -го СК дорівнює нулю.

При дослідженні електричних процесів перетворювачів модульної структури як базові обрані параметри струму $i_{Lk}(t)$ дроселя і час t_k k -го СК [1; 2; 4]:

$$i_{Lk}(t) = \begin{cases} i_{Lhk}(t) & \text{при } 0 \leq t \leq t_{hk}, \\ i_{Lvk}(t) & \text{при } t_{hk} < t \leq t_{hk} + t_{vk}; \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{Lhk}(t) = I_{m1k} \frac{t_k}{t_{hk}}, \quad i_{Lvk}(t) = I_{m2k} \left(1 + \frac{t_{hk} - t_k}{t_{vk}} \right); \quad (2)$$

$$I_{m1k} = (U_{\text{п}} - U_{\text{н}}) t_{hk} / L_{1k}, \quad I_{m2k} = U_{\text{н}} t_{vk} / L_{2k}; \quad (3)$$

$$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} + T & \text{при } t - t_{ck} < 0, \\ t - t_{ck} & \text{при } 0 \leq t - t_{ck} < T, \\ t - t_{ck} - T & \text{при } t - t_{ck} > T, \end{cases} \quad (4)$$

де, I_{m1k} і I_{m2k} – розмахи пульсацій відповідно струму $i_{Lhk}(t)$ дроселя k -го СК в

індуктивності L_{1k} первинної напівобмотки на інтервалі накопичення t_{hk} і струму $i_{Lbk}(t)$ в індуктивності L_{2k} вторинної напівобмотки на інтервалі (возврату) повернення;

t – поточний час; $t_{ck} = (k - 1)T_{\Pi}$ – часовий зсув електричних процесів k -го СК щодо початку координат (за початок координат приймаємо момент часу переходу в провідний стан силового керованого ключа на рис. 2, S_{1k} першого силового каналу СК₁);

U_{Π} , $U_{\text{н}}$ – напруги живлення від первинного джерела та напруги навантаження ППН.

У перетворювачах модульної структури суми струмів дроселів $i_{Lk}(t)$ СК з урахуванням тимчасового зсуву k -х СК на інтервалах накопичення $t_{ckh} = t_{ck} + t_{hk}$ визначають струм у колах споживання і при однофазному (рис. 1, а), і при багатофазному (рис. 1, б) принципах перетворення

$$i_{\text{оп}}(t) = i_{\text{мп}}(t) = i_{\Pi}(t) = \sum_{k=1}^N i_{hk}(t) \quad \text{при } t_{ck} \leq t \leq t_{ckh}. \quad (5)$$

На інтервалі періоду $T_k = t_{ckh} + t_{ckb}$ перетворення електричної енергії k -го силового каналу СК (де $t_{ckb} = t_{ck} + t_{bk}$ – часовий зсув k -х СК на інтервалах повернення) струми навантаження і при однофазному (рис. 1, а), і при багатофазному (рис. 1, б) режимах роботи визначаються величинами струмів $i_{Lk}(t)$ дроселів k -х СК

$$i_{\text{он}}(t) = i_{\text{мн}}(t) = i_{\text{н}}(t) = \sum_{k=1}^N i_{Lk}(t) \quad \text{при } t_{ckh} < t \leq t_{ckh} + t_{ckb}. \quad (6)$$

Співвідношення (5), (6) дозволяють визначити розмахи пульсацій струмів у вхідних ΔI_{Π} та вихідних $\Delta I_{\text{н}}$ колах у вигляді

$$\Delta I_{\Pi} = I_{\Pi \text{ max}} - I_{\Pi \text{ min}}, \quad \Delta I_{\text{н}} = I_{\text{н max}} - I_{\text{н min}}; \quad (7)$$

$$I_{\Pi \text{ min}} = \min_{\text{max}} \sum_{k=1}^N i_{pk}(t), \quad I_{\text{н min}} = \min_{\text{max}} \sum_{k=1}^N i_{hk}(t), \quad (8)$$

де $I_{\Pi \text{ max}}$, $I_{\text{н max}}$ та $I_{\Pi \text{ min}}$, $I_{\text{н min}}$ – максимальні та мінімальні значення струмів у колах споживання від джерела первинного живлення $i_{\Pi}(t)$ та навантаження $i_{\text{н}}(t)$.

У роботі виконано дослідження електричних процесів перетворювачів модульної структури з СК понижуючого типу при однофазному та багатофазному принципах перетворення з використанням співвідношень (1)÷(8) та математичної моделі, [1; 4]. Для дослідження електричних процесів і розрахунку параметрів елементів перетворювачів модульної структури було розроблено алгоритми і програмне забезпечення в середовищі програмування Delphi [5; 6]. Нижче наведено результати досліджень із використанням даного програмного забезпечення.

Під час створення пристрою чи системи електроживлення з N модулів – силових каналів фіксованої потужності не менший інтерес представляє оцінка впливу режимів їх функціонування на всю систему загалом [6].

При збереженні незмінної потужності в колі навантаження окремо взятого k -го СК $P_{hk} = \text{const}$, наприклад, $P_{hk} = 100$ Вт, збільшення кількості силових каналів і при однофазному і багатofазному принципах перетворення призводить до збільшення потужності навантаження, наприклад при $N = 2$ до $P_n = 200$ Вт, при $N = 4$ до $P_n = 800$ Вт, і так далі.

При однофазному режимі роботи сумарні струми на вході ОП, $i_{оп}(t)$ (рис. 3, а, б, в, рис. 4, а) і виході $i_{он}(t)$ (рис. 3, з, д, е), (рис. 4, б) ППН містять у N раз більші розмахи пульсацій $\Delta I_{оп}$, $\Delta I_{он}$, змінних складових струмів, ніж розмахи $\Delta I_{пк}$, $\Delta I_{нк}$ пульсацій струмів на вході $i_{пк}(t)$ і виході $i_{нк}(t)$ в окремо взятих k -х силових каналах визначається співвідношенням (9).

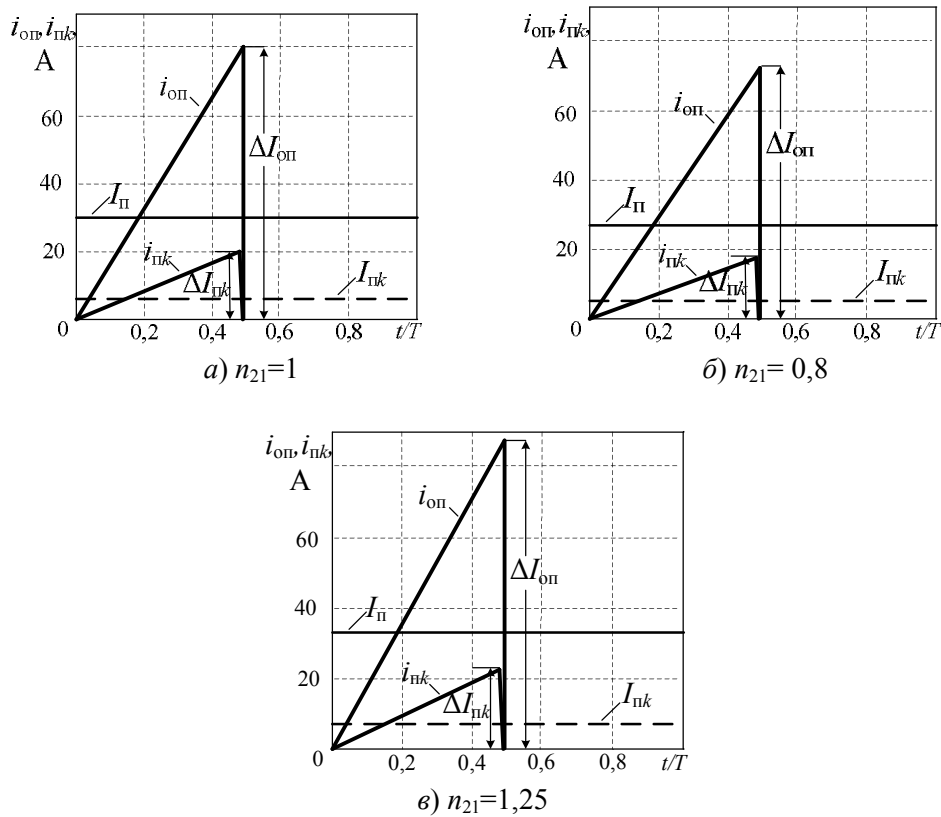
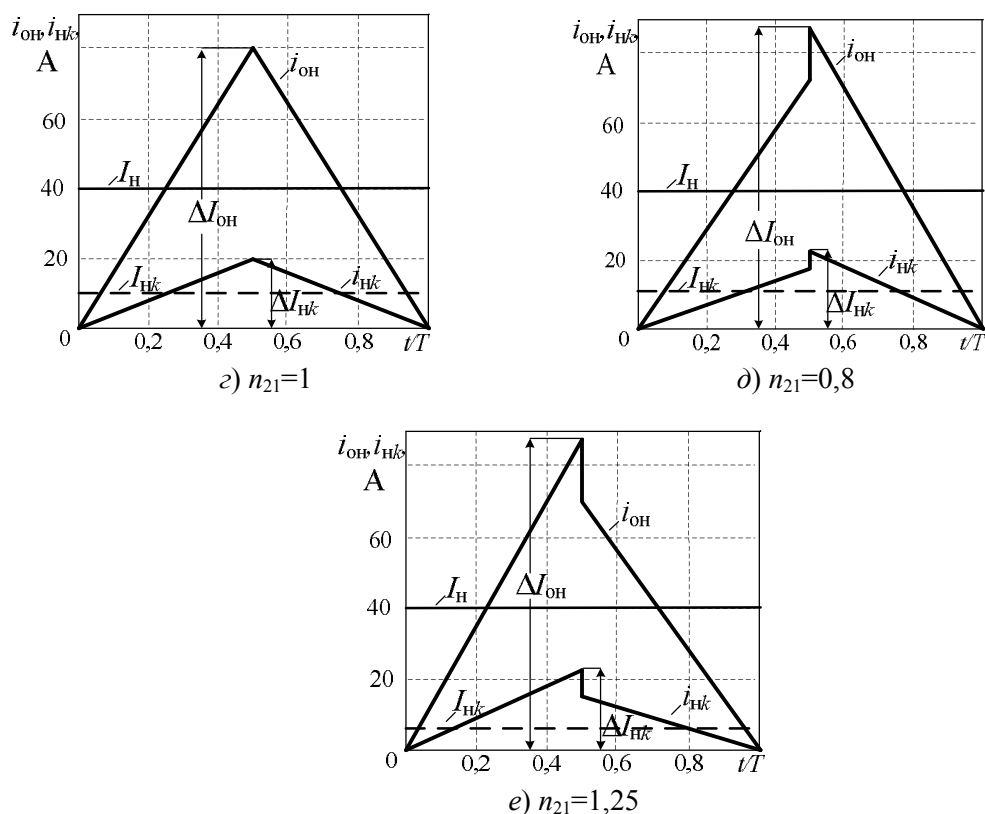


Рис. 3. Часові діаграми струмів ОПН у входних $i_{он}(t)$ (а, б, в) колах при $N=4$, $U_n=\text{const}$, $k_{Hk}=0,5$



Продовження рис. 3. Часові діаграми струмів ОП у вихідних $i_{oh}(t)$ (з, д, е) колах при $N=4$, $U_n=const$, $k_{Hk}=0,5$

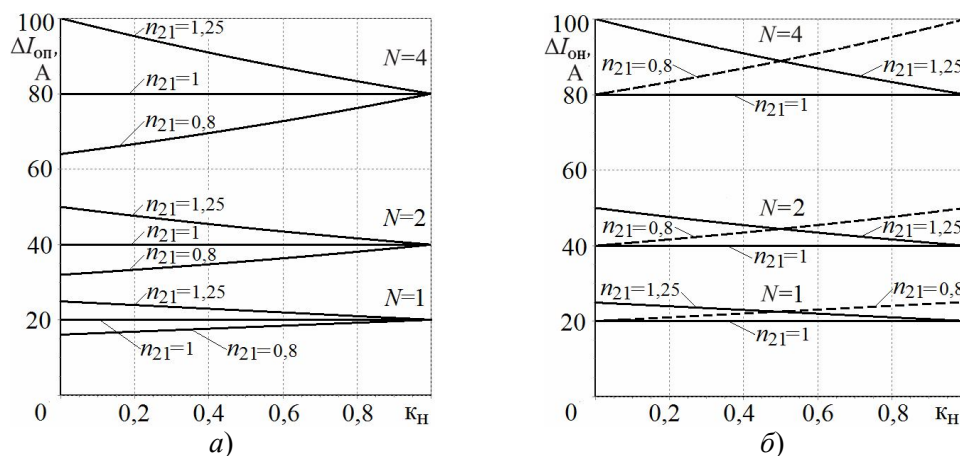


Рис. 4. Залежності величини пульсацій струмів споживання ΔI_{on} (а) та навантаження ΔI_{on} (б) ОП при $P_{nk}=100$ Вт

$$\begin{aligned}\Delta I_{\text{оп}} &= N \Delta I_{\text{пк}}, & \Delta I_{\text{он}} &= N \Delta I_{\text{нк}}; \\ \Delta I_{\text{пк}} &= I_{\text{м1к}}, & \Delta I_{\text{нк}} &= \begin{cases} I_{\text{м1}} & \text{при } n_{21} \geq 1; \\ I_{\text{м2}} & \text{при } n_{21} < 1. \end{cases}\end{aligned}\quad (9)$$

Збільшення числа N силових каналів при незмінній потужності навантаження k -х СК $P_{\text{нк}}=\text{const}$ призводить до збільшення розмахів пульсацій струмів на вході $\Delta I_{\text{оп}}$ (рис. 4, а) і виході $\Delta I_{\text{он}}$ (рис. 4, б) пропорційно кількості N силових каналів і при $n_{21}=1$, і при $n_{21}\neq 1$.

При збереженні незмінної потужності кола навантаження перетворювача ($P_{\text{н}}=\text{const}$, наприклад, $P_{\text{н}} = 400\text{Вт}$), потужність $P_{\text{нк}}$ окремо взятого k -го силового каналу, визначається як $P_{\text{нк}}=P_{\text{н}}/N$. При цьому розмахи пульсацій $\Delta I_{\text{оп}}$ і $\Delta I_{\text{он}}$ відповідно струмів споживання $i_{\text{оп}}(t)$ і навантаження $i_{\text{он}}(t)$ залишаються незмінними незалежно від числа N силових каналів (рис. 5, а, б).

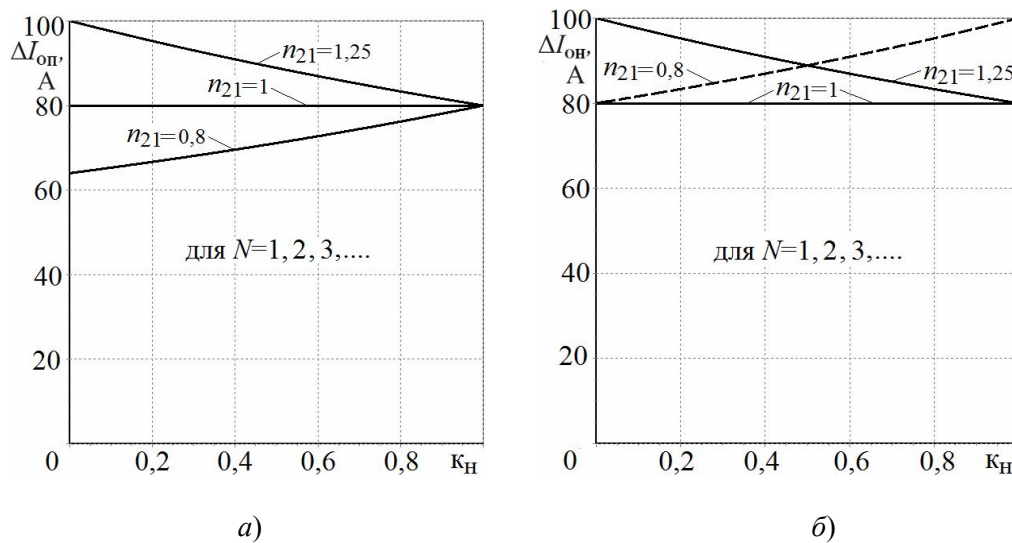


Рис. 5. Залежності пульсацій струмів споживання $\Delta I_{\text{оп}}$ (а) та навантаження $\Delta I_{\text{он}}$ (б) ППН модульної структури при однофазному принципі перетворення при $P_{\text{н}}=\text{const}=400\text{ Вт}$

Вибір коефіцієнта трансформації дроселя n_{21} таким, що не дорівнює одиниці ($n_{21}\neq 1$) призводить при $n_{21}<1$ до зменшення розмаху пульсації $\Delta I_{\text{оп}}$, а при $n_{21}>1$ до збільшення (рис. 4, а; рис. 5, а; рис. 6).

На рисунку 6 наведені часові діаграми струмів у колах споживання від первинного джерела живлення $i_{\text{пк}}(t)$ (а, б) і навантаження $i_{\text{нк}}(t)$ (в, г) в k -х силових каналах ППН понижуючого типу для режиму стабілізації ($U_{\text{н}}=\text{const}$) при $n_{21}=1$; $n_{21}>1$; $n_{21}<1$ і значення коефіцієнта накопичення $\kappa_{\text{н}}=\text{const}$, рівному 0,5.

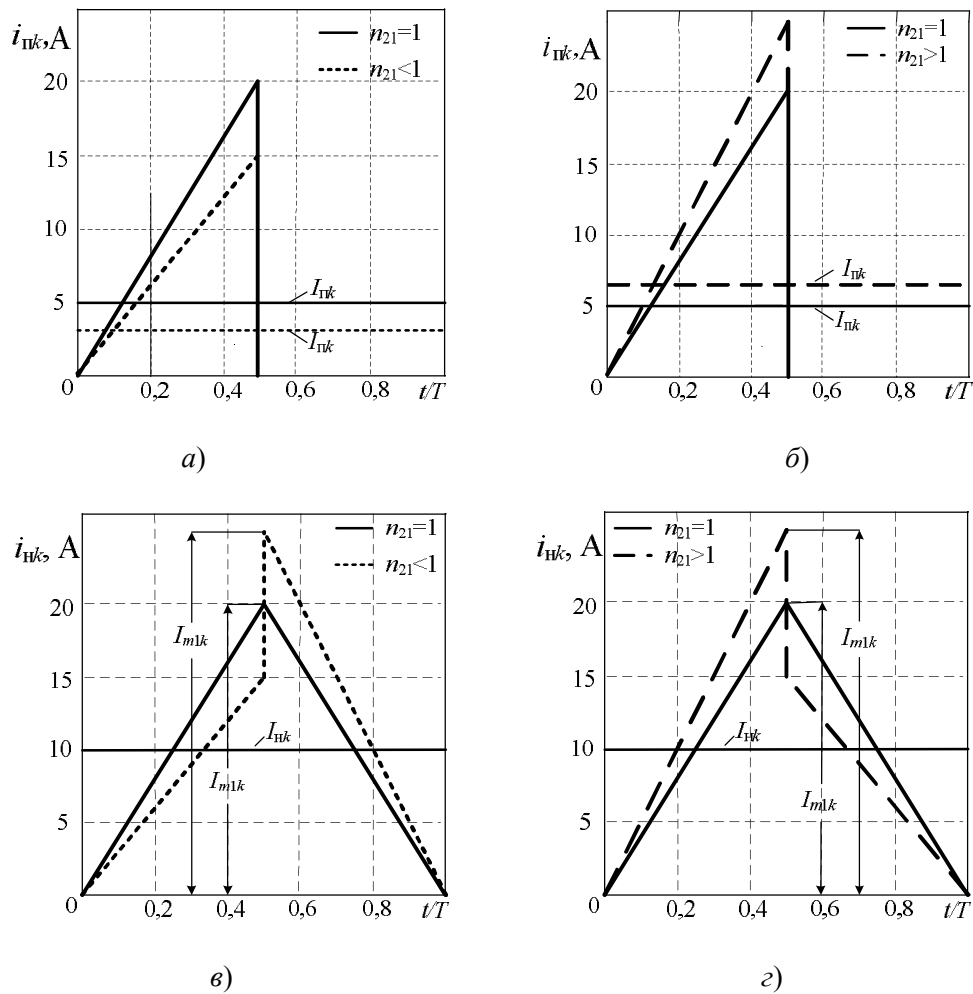
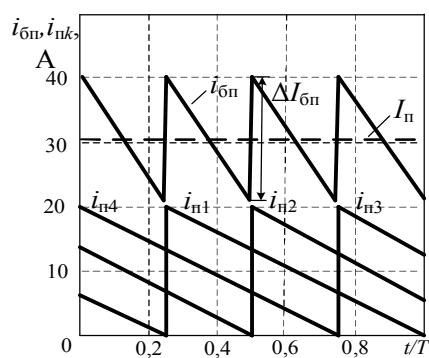


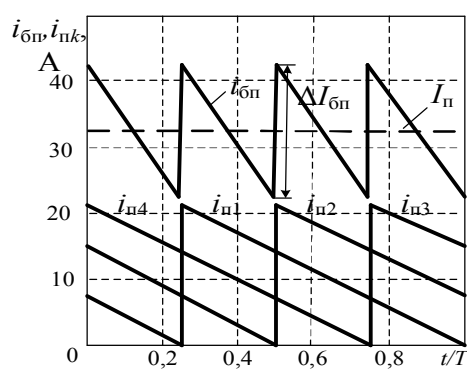
Рис. 6. Часові діаграми струмів споживання $i_{nk}(t)$ (а, б) та навантаження $i_{nk}(t)$ (в, г) у k -х силових каналах при різних коефіцієнтах трансформації n_{21}

Бачимо, що при збереженні $I_{nk} = \text{const}$, $k_n = \text{const}$ приводить при $n_{21} < 1$ до зменшення I_{m1k} , а при $n_{21} > 1$ – до збільшення I_{m1k} , в порівнянні з $n_{21} = 1$ (див. рис. 6, в, г і рис 5, а). При цьому і при $n_{21} < 1$ і при $n_{21} > 1$ відбувається збільшення $\Delta I_{\text{он}}$, порівняно з $n_{21} = 1$ (див. рис. 6, г, і рис. 5, б).

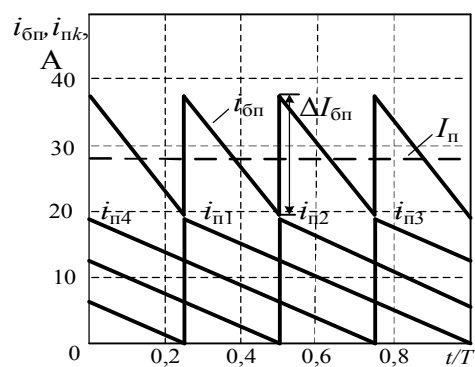
При багатофазному принципі перетворення, струми k -х силових каналів рівномірно зміщені у часі один відносно одного (рис. 7) на інтервал часу $T_n = T/N$. Це призводить до суттєвої зміни характеру сумарних струмів на вході $i_{\text{он}}(t)$ (рис. 7, а, б, в) та виході $i_{\text{он}}(t)$ (рис. 7, г, д, е) перетворювача модульної структури.



а) $n_{21}=1$

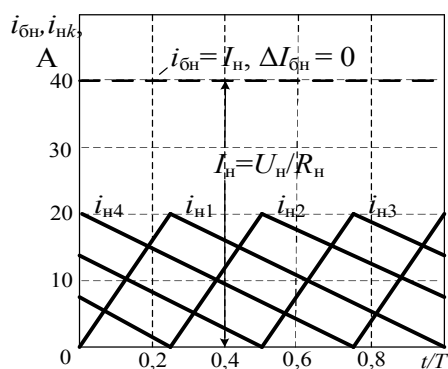


б) $n_{21}=0,8$

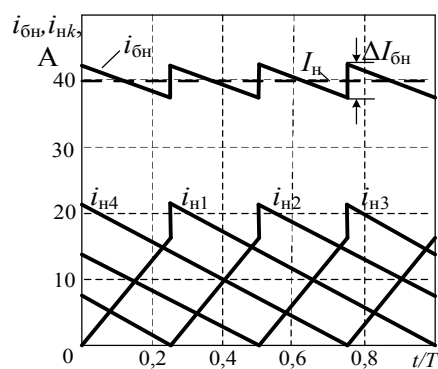


в) $n_{21}=1,25$

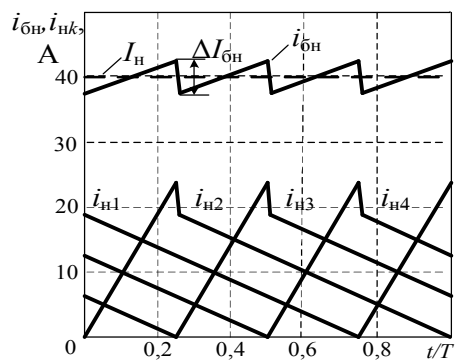
Рис. 7. Часові діаграми струмів БП у входних $i_{6n}(t)$ (а, б, в) колах при $N=4$, $U_H=\text{const}$, $kn_k=0,25$



з) $n_{21}=1$



д) $n_{21}=0,8$



е) $n_{21}=1,25$

Продовження рис. 7. Часові діаграми струмів БПП
у вихідних $i_{oh}(t)$ (з, д, е) колах при $N=4$, $U_h=const$, $\kappa_k=0,25$

Струми $i_{\text{он}}(t)$, що споживаються БП від джерела первинного електроживлення, мають тим менший рівень змінної складової порівняно з струмом $i_{\text{оп}}(t)$ ОП, чим більше число N силових каналів СК. Більше того, частота пульсацій збільшується в N разів (рис. 7), що також сприяє зменшенню габаритів згладжуючих фільтрів.

Збільшення кількості СК при $P_{\text{нк}} = \text{const}$, як зазначалося вище, призводить до збільшення потужності $P_{\text{н}}$ кола навантаження перетворювача. Але на відміну від ОП при багатофазному принципі перетворення підвищення вихідної потужності перетворювача шляхом збільшення числа N силових каналів СК при $P_{\text{нк}} = 100$ Вт не призводить до збільшення рівнів змінних складових на вході $\Delta I_{\text{оп}}$ та виході $\Delta I_{\text{он}}$ перетворювача.

За будь-якого числа N силових каналів СК розмах $\Delta I_{\text{п}}$ пульсацій залишається незмінним, рівним розмаху $\Delta I_{\text{пк}}$ пульсації окремо взятого силового каналу ($\Delta I_{\text{п}} = \Delta I_{\text{оп}} = \Delta I_{\text{пк}}$ – рис. 8, а).

При збереженні незмінної потужності кола навантаження ($P_{\text{н}} = \text{const}$), зі збільшенням числа силових каналів ($N=2, 4$), потужність $P_{\text{нк}}$ в окремо взятому силовому каналі СК зменшується ($P_{\text{нк}} = P_{\text{н}}/N$), тому у вхідному ланцюзі БП відбувається зменшення розмаху $\Delta I_{\text{п}} = \Delta I_{\text{оп}} = \Delta I_{\text{пк}}$ і при $n_{21}=1$, і при $n_{21} \neq 1$. (рис. 8, б).

У ланцюзі навантаження БП спостерігається не збільшення, як у ОП (рис. 5, а), а зменшення розмаху $\Delta I_{\text{он}}$ змінної складової струму $i_{\text{он}}(t)$, яка стає тим менше пульсації струмів $\Delta I_{\text{пк}}$ k -го силового каналу, чим більше число N силових каналів (рис. 9, 10).

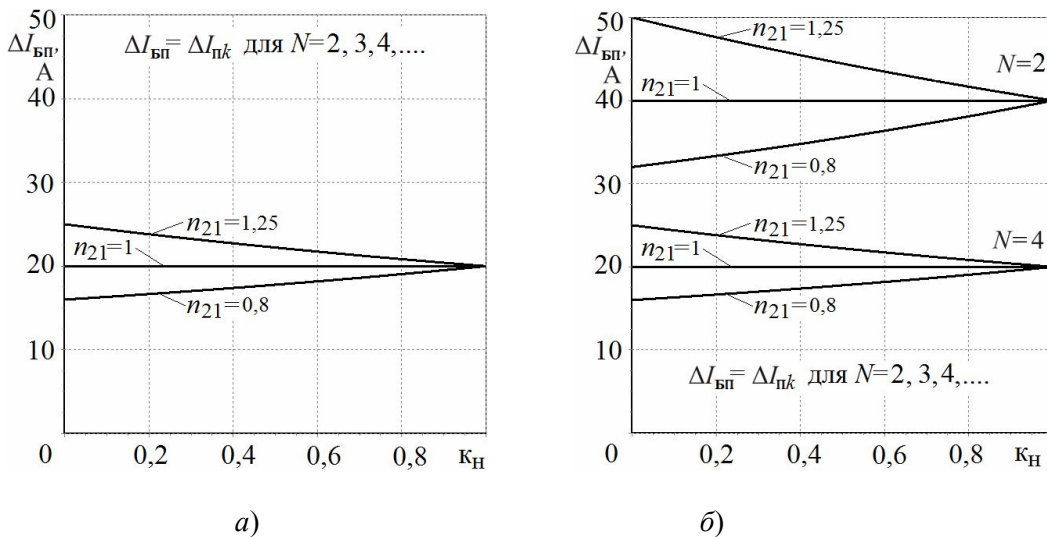


Рис. 8. Залежності пульсацій струмів споживання від джерела первинного електроживлення $\Delta I_{\text{он}}$ багатофазного імпульсного перетворювача при $P_{\text{нк}} = 100$ Вт (а) та $P_{\text{нк}} = 400$ Вт (б)

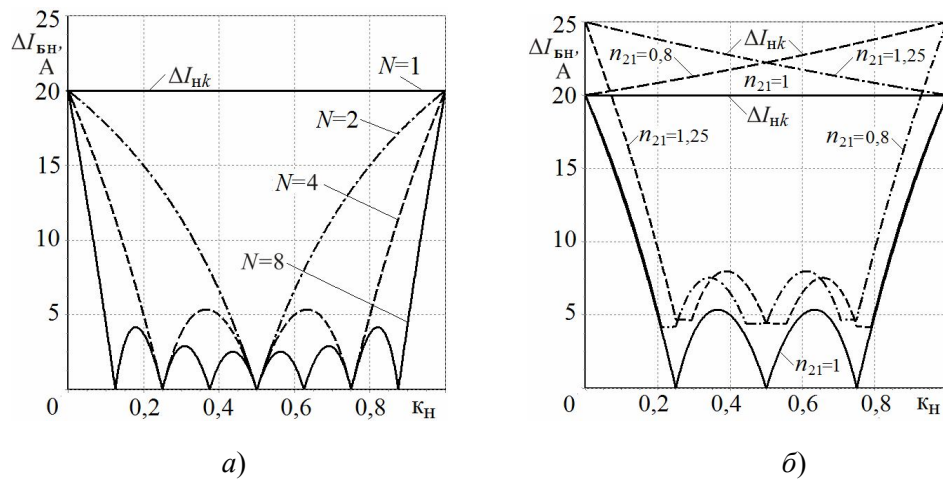


Рис. 9. Залежності пульсацій струмів навантаження $\Delta I_{\text{БН}}$ ППН модульної структури з багатофазним принципом перетворення з $P_{\text{нк}} = \text{const} = 100 \text{ Вт}$, при $n_{21} = 1$ (а) та $n_{21} = 1; 1,25; 0,8$ (б)

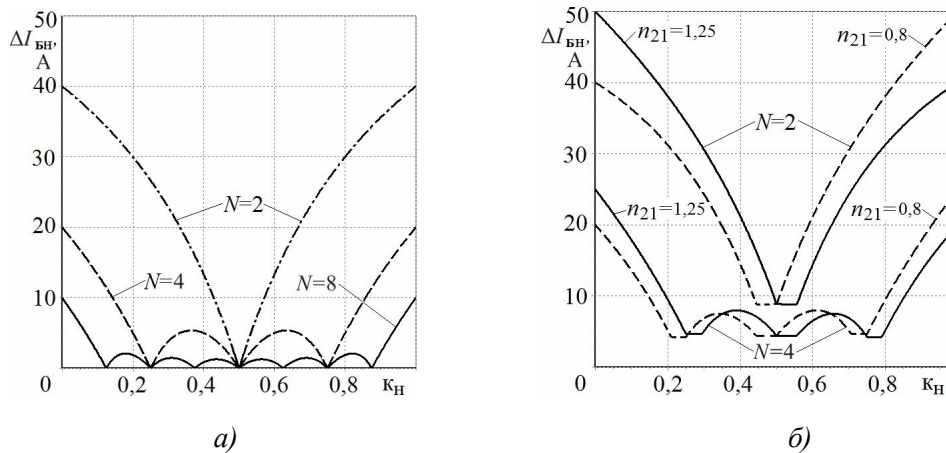


Рис. 10. Залежності пульсацій струмів навантаження $\Delta I_{\text{БН}}$ БПП від величини коефіцієнта накопичення при $P_{\text{н}} = \text{const} = 800 \text{ Вт}$ (при $n_{21} = 1$ (а) та $n_{21} = 1,25; 0,8$ (б))

Висновки. Проведено дослідження та виявлено специфічні особливості електричних процесів імпульсних перетворювачів модульної структури з одно фазним та багатофазним принципами перетворення з силовими каналами понижуючого типу у граничному режимі функціонування:

- показано, що у перетворювачах модульної структури при однофазному принципі перетворення ефект фільтрації змінних складових у входних та вихідних колах відсутній, у той час як при багатофазному – зі збільшенням числа N силових каналів фільтруючі властивості зростають (поліпшуються);

- встановлено, що в загальному випадку відхилення коефіцієнтів трансформації n_{21} дроселів k -х силових каналів від значення, що дорівнює одиниці, призводить до збільшення коефіцієнтів пульсацій у вихідних колах перетворювачів і при однофазному і при багатofазному принципах перетворення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кочетков О.В. Методи автоматизованого дослідження перетворювачів постійної напруги. Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2024): proceedings, Odesa, Ukraine, May 15, 2024. Odesa: Odesa Military Academy, 2024. С. 39-40.
2. 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. С. 7-21.
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», 22–23 листопада 2022 р. Одеса: НУ «ОМА», 2023. Вип. 203. С. 85-89.
4. 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», 22–23 листопада 2023 р. Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 104-107.
5. Кочетков О.В., Машін В.М., Криворучко Д.Ю., Гаур Т.О., Дранчук С.М., Харченко Р.Ю. Алгоритми автоматизованого дослідження перетворювачів постійної напруги модульної структури. Вісник Одеського національного морського університету, 2025, № 3 (77). – С. 117-128. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-3-117-128>
6. 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», 22-23 листопада 2023 р. Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 108-110.

REFERENCES

1. Kochetkov O.V. (2024). Metody avtomatyzovanoho doslidzhennia peretvoriuvachiv postiinoi napruhy [Methods of automated research of DC voltage converters] In Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2024): Proceedings (Odesa, Ukraine, May 15, 2024) Odesa: Odesa Military Academy. pp. 39-40. (in Ukrainian)

2. 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, pp. 7-21.
3. Kharchenko R.Y., Zavadskiy V.A., Kochetkov A.V. (2023). Methods for automated research of DC voltage converters. In *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Ship Electrical Engineering, Electronics and Automation»* Original conference held (November 22–23, 2022). Odesa: NU «OMA». P. 85-89.
4. Kochetkov O.V., Zarytska O.I., Gaur T.O. (2023). Doslidzhennia vplyvu velychyny vkhidnoi napruhy na pokaznyky yakosti elektrychnoi enerhii peretvoriuvachiv postiinoi napruhy modulnoi struktury [Research of the influence of input voltage magnitude on the power quality indicators of modular-structure DC voltage converters] In *Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference «Ship Electrical Engineering, Electronics and Automation»*. Original conference held (November 22–23, 2022). Odesa: NU «OMA». P. 104-107. (in Ukrainian)
5. Kochetkov O.V., Mashin V.M., Kryvoruchko D.Y., Gaur T.O., Dranchuk S.M., Kharchenko R.Y. (2025). Alhorytmy avtomatyzovanoho doslidzhennia peretvoriuvachiv postiinoi napruhy modulnoi struktury [Algorithms for automated research of modular-structure DC voltage converters]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*, vol. 3(77). P. 117-128. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-3-117-128> (in Ukrainian)
6. Kharchenko R.Y., Kochetkov O.V., Gaur T.O. (2023). Elektrychni protsesy pidvyshchuiuchykh peretvoriuvachiv postiinoi napruhy modulnoi struktury v hranychnomu rezhymi funktsionuvannia. [Electrical processes of modular-structure step-up DC voltage converters under boundary operating conditions] In *Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference «Ship Electrical Engineering, Electronics and Automation»* Original conference held (November 22-23, 2022). Odesa: NU «OMA». P. 108-110. (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 03.12.2025

Посилання на статтю: Кочетков О.В., Машін В.М., Дранчук С.М., Цацко В.І., Єрпельова А.В. Підвищення ефективності суднових електроенергетичних систем при використанні імпульсних перетворювачів електричної енергії // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 97-112. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-97-112.

Article received 03.12.2025

Reference a Journal Artic: Kochetkov O., Mashin V., Dranchuk S., Tsatsko V., Yerpelova A. Increasing the efficiency of ship electric power systems using pulse electric energy converters // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 97-112. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-97-112.