

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОФАЗНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

*Анотація.* Розглянуто особливості мініатюризації багатофазних імпульсних перетворювачів постійної напруги (БП). Запропоновано методику автоматизованого проектування БП за критерієм мінімального обсягу при забезпеченні заданої якості вихідної напруги. Методика відображає основні етапи процесу проектування, розкриває додаткові можливості зменшення пасивних реактивних накопичувачів електричної енергії.

*Ключові слова:* багатофазні імпульсні перетворювачі постійної напруги (БП), мініатюризація, методика проектування.

I.P. MALYAVIN

Odessa National Academy of Telecommunication named after A.S. Popov

### METHODOLOGY OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF MULTIPHASE PULSE CONVERTERS OF CONSTANT VOLTAGE

*Abstract.* Features of the miniaturization of multiphase pulse converters of constant voltage (MPC) – were considered. The methodology of computer-aided design MPC criterion for minimum while ensuring the desired quality of output voltage was proposed. Methodology reflects the main stages of the design process, reveals additional features reduce reactive passive storage of electrical energy.

*Keywords:* multiphase pulse converters of constant voltage (MPC), miniaturization, design methodology

Надання якісних і надійних інформаційних послуг є основним завданням телекомунікаційних засобів [1].

З цією метою передбачається впровадження сучасних засобів електроживлення телекомунікаційного обладнання [1, 2].

Використання імпульсних перетворювачів постійної напруги (ППН) модульної структури, виконаних з паралельно включених  $N$  однотипних силових каналів СК<sub>*k*</sub>, що працюють на загальне навантаження  $H$  від джерела первинного електроживлення ДПЕ (рис. 1), спрямоване на підвищення коефіцієнта корисної дії, здатності навантаження силових комутуючих елементів (і ППН в цілому), надійності та технологічності. На рис. 1: СУ – схема управління;  $U_{п(н)}$  – напруга первинного живлення (навантаження) ППН;  $u_{yk}$  – напруга управління  $k$ -го СК.

Перехід до багатофазної структури модульних ППН – до багатофазних імпульсних перетворювачів (БП) – сприяє зменшенню обсягу і маси реактивних елементів вхідних і вихідних згладжують фільтрів ППН засобів електроживлення телекомунікаційних систем. Багатофазний принцип перетворення і регулювання електричної енергії в БП реалізується за рахунок забезпечення часового зсуву між електричними процесами в  $k$ -х СК і загальних електричних колах, у яких здійснюється підсумовування зміщених у часі електричних процесів [3 – 7].

Розробка методики автоматизованого проектування імпульсних ППН модульної структури, зокрема БП, сприяє їхньому практичному впровадженню.

Вимоги високої якості електроенергії обумовлюють наявність у структурі ППН великогабаритних реактивних елементів, які визначають геометричний об'єм  $V_T$ . Енергетичні втрати, що супроводжують процес імпульсного перетворення електричної енергії, змушують застосовувати спеціальні засоби охолодження, що збільшують тепловий обсяг  $V_T$ .

Отже, при проектуванні одним з головних залишається завдання поліпшення (зменшення) масогабаритних показників ППН – забезпечення мінімального питомої обсягу [8, 9].

У статті розглянуто методику проектування ППН за критерієм мінімального питомої обсягу  $V_{min}$  при забезпеченні заданої якості вихідної напруги.

У загальному вигляді проблема мінімізації обсягу визначає два напрямки вирішення задачі оптимізації за критерієм  $V_{min}$ : «теплове» і «геометричне». Перше охоплює набір засобів, що зменшують необхідний тепловий обсяг  $V_T$ . Друге – сукупність засобів, що сприяють зменшенню  $V_T$ . У загальному вигляді критерій оптимізації

ППН прийме вигляд [8, 9]:

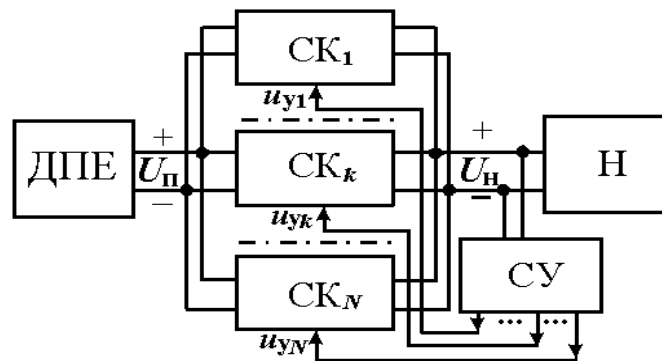


Рис. 1. ППН модульної структури

$$V_{\min} = \begin{cases} V_T, & \text{при } V_T > V_G, \\ V_G, & \text{при } V_G \geq V_T. \end{cases} \quad (1)$$

Проведені дослідження [3 – 7] показали зв'язок між сукупністю показників якості ППН модульної структури в цілому і показників якості окремо взятого СК. Тому в ППН доцільно провести оптимізацію обсягу окремо взятого СК, враховуючи в його вихідних даних особливості ППН.

Геометричний об'єм  $V_G$  визначається як сума фізичних обсягів елементів перетворювача, розміщених в герметичному корпусі, з урахуванням конструктивних коефіцієнтів окремих елементів і вузлів [8]. З урахуванням обсягів основних елементів, що входять до складу силових каналів (СК) кількість яких  $N$ , геометричний об'єм  $V_G$  ППН визначається як [8]:

$$V_G = NV_k + V_{CY}, \quad \dots\dots(2)$$

де  $V_k = V_{Lk} + V_{Cn} + V_{Cn} + V_{Tp} + V_D + V_{доп}$  – об'єм одного СК;  $V_{Lk}, V_{Cn}, V_{Cn}, V_{Tp}, V_D, V_{доп}$  – об'єми дроселя, конденсаторів фільтрів (вхідного і навантаження), силового транзистора, блокуючого діода, допоміжних вузлів;  $V_{CY}$  – об'єм схеми управління.

Енергетичні втрати (сумарна потужність втрат елементів схеми  $P_{пнн}$ ) визначають необхідну поверхню тепловідводу – тепловий обсяг ППН  $V_T$ . При виборі корпусу, виконаного несекціонованим у вигляді паралелепіпеда, необхідно, щоб допустима температура перегріву елементів ППН в монтажній зоні над температурою навколишнього середовища не перевищувала допустиму для використовуваної елементної бази. Тепловий обсяг можна визначити як [8]:

$$V_T = K'_c K'_b [N S_{то} P_{пнн} / 2 (K'_c + K'_b + K'_c K'_b)], \quad (3)$$

де  $K'_c = c/a$ ;  $K'_b = b/a$ ;  $a, b, c$  – розміри корпусу ППН;  $S_{то}$  – питома поверхня тепловідведення;  $P_{пнн}$  – втрати (теплова потужність, що розсіюється на елементах) ППН.

Збільшення частоти комутації (перетворення)  $f$  призводить до зменшення геометричних обсягів конденсаторів і моткових елементів [8], отже, до зменшення геометричного об'єму  $V_G$ .

Але збільшення частоти  $f$  також призводить до збільшення втрат на перемагнічування сердечників моткових елементів (індуктивності резонансного контуру), до збільшення втрат за рахунок вихрових струмів, до збільшення динамічних втрат у силових комутуючих елементах (транзисторах, діодах).

Отже, можливий вибір оптимальної частоти  $f$ , що забезпечує мінімально можливий обсяг ППН (рис. 2).

Відзначимо, що ефективність ППН підвищується, якщо вся теплова енергія, що виділяється (або її частина, що залежить від частоти перетворення  $f$ ) передається від тепловідділюючих елементів до елементів конструкції апаратури і повністю поглинається ними. При цьому використання в ППН – в якості силових ключів – напівпровідникових приладів з кращими комутаційними властивостями зменшує масу тепловідвідних елементів.

На рис. 2 наведені типові залежності маси окремих елементів ( $m$ ) і перетворювача в цілому від частоти перетворення електроенергії  $f$ . Крива 1 характеризує залежність сумарної маси реактивних елементів ППН від частоти перетворення; крива 2 – використання в ППН напівпровідникових приладів з високими комутаційними властивостями; крива 3 – випадок, коли вся теплова енергія, що виділяється в ППН, повністю поглинається елементами конструкції апаратури без збільшення їх маси з частотою перетворення.

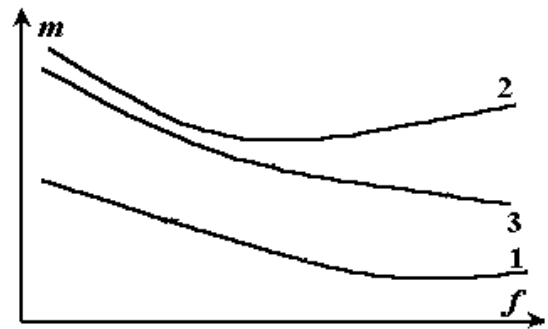


Рис. 2. Типові залежності маси окремих елементів і ППН від частоти

Завданням перетворювача електричної енергії (ПЕЕ) є перетворення енергії однієї кількості та якості в іншу, необхідну для навантаження. При цьому навантаженні, як правило, байдуже, за якою структурною схемою виконаний ПЕЕ і який принцип роботи реалізується в його функціональних вузлах, якщо забезпечуються вихідні параметри технічних вимог в заданих умовах роботи при мінімумі обраного критерію – наприклад, в нашому випадку, обсягу. Вибір типу ПЕЕ в оптимальному значенні не представляється можливим, тому він може бути вирішений лише шляхом перебору розглянутих варіантів ПЕЕ, а не шляхом строгої математичної оптимізації. Тому надалі вибирається тип ПЕЕ, що забезпечує не оптимальне, а мінімальне значення обсягу з урахуванням заданих вихідних даних – умов експлуатації, обмежень по елементній базі, вихідної потужності, показників якості.

Отже, з викладеного випливає, що при оптимізації значень технічних параметрів ППН в якості змінних параметрів доцільно вибрати частоту комутації  $f$ , число силових каналів СК  $N$ , які найбільш ефектно впливають на мініатюризацію ППН.

Виходячи зі сказаного, пропонується наступна методика проектування, що використовує отримані

результати дослідження ППН [3 – 7]:

1. Формування вихідної бази даних – довідкових електричних і масогабаритних параметрів елементів схеми ППН (конденсаторів, дроселів, транзисторів тощо) з їх технологічними та температурними відхиленнями для різних типів елементної бази, і вузлів (елементів) типових, що випускаються промисловістю, схем управління (контролерів). У базу даних повинні також входити нормативні обмеження на електричні характеристики елементів схеми, які обумовлені в технічних умовах на елементи. Повинна бути передбачена можливість поповнення її змісту шляхом збільшення числа розглянутих елементів, введення нових типів елементної бази.

У загальному вигляді база даних повинна являти собою масиви параметрів, що визначають тип обраної елементної бази:

- масив, що включає в себе номінальні значення параметрів всіх елементів з урахуванням конкретного типу елементної бази;
- масиви, що містять мінімальні і максимальні значення цих параметрів з урахуванням температурного і технологічного розкиду;
- масив, що включає в себе нормативні обмеження на електричні характеристики елементів.

2. Визначення бажаних частотних характеристик, мінімально допустимої частоти комутації  $f$ .

3. Вибір параметрів і розрахунок показників якості електричного процесу. На цьому етапі, зокрема, визначаються параметри для знаходження оптимального (мінімально необхідного) значення числа СК  $N$  – початкове, кінцеве значення і крок зміни числа СК.

4. Розрахунок геометричного об'єму корпусу  $V_T$  по співвідношенню (2).

Відзначимо, що при зменшенні індуктивності дроселя  $k$ -го СК  $L_k$  збільшується пульсація на вході і виході ППН, для збереження пульсацій напруги  $\Delta U_n, \Delta U_p$  в заданих межах потрібне збільшення величин ємності  $C_n$  і  $C_p$  силових згладжувальних фільтрів навантаження (н) та первинного (п) електроживлення відповідно.

Ємності на вході  $C_n$  і виході  $C_p$  визначаються як [9]:

$$C_{n(p)} \geq [\Delta I_{n(p)}^2 / (\Delta U_{n(p)}^2 \omega_{\text{ппн}}^2) - 1 / R_{n(p)}^2 \omega_{\text{ппн}}^2]^{0.5}, \quad (4)$$

де  $\Delta U_{n(p)}$  – пульсації напруги на навантаженні (на вході) ППН;  $R_{n(p)}$  – опір навантаження (на вході),  $\omega_{\text{ппн}} = 2\pi f$  – циклічна робоча частота ППН.

Пульсації по струму  $\Delta I_{n(p)}$  визначаються за допомогою співвідношень відповідної математичної моделі [3 – 7], в залежності від режиму функціонування – граничний (або розривний, або безрозривний), для симетричних електричних процесів або при наявності їх асиметрії. Пульсації по напрузі  $\Delta U_n$  задаються в якості вихідних даних. Вхідні пульсації  $\Delta U_p$  розраховуються.

5. Аналіз параметрів електричного процесу, енергетичних і масогабаритних показників ППН при заданих вхідній і вихідній напрузі, відомих параметрах елементної бази, частоті комутації, параметрах фільтрів тощо.

6. Визначення теплового обсягу ППН  $V_T$  по співвідношенню (3).

7. Порівняння  $V_T$  з  $V_T$  і вибір мінімального – співвідношення (1).

Запропонована методика проектування відображає логіку взаємодії окремих завдань проектування широкого класу пристроїв з імпульсним способом перетворення електричної енергії, в тому числі ППН модульної структури. Крім того, методика відображає найбільш значні етапи процесу проектування.

Виходячи з методики, пропонується наступний алгоритм для вирішення завдання автоматизованого проектування імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури за критерієм мінімального обсягу  $V_{\text{min}}$ , структурна схема якого представлена на рис. 3.

Проведений аналіз електричних процесів і енергетичних співвідношень [3 – 7] в ППН, а також загальний підхід, викладений вище, дозволяє визначити тепловий  $V_{\text{тк}}$  і геометричний  $V_{\text{гк}}$  обсяги  $k$ -го СК перетворювача при циклічному порядку зміни – робочої частоти (комутації)  $f$  і кількості СК  $N$  на обрані величини приростів.

**Крок 1.** Введення необхідних даних (блок 2): діапазон зміни напруг живлення  $U_{\text{п min}} \div U_{\text{п max}}$ ; допустимі пульсації  $\Delta U_{\text{удоп}}$  напруги навантаження ППН; допустимі пульсації струму на вході  $\Delta I_{\text{удоп}}$  і в навантаженні ППН  $\Delta I_{\text{удоп}}$ ; струм навантаження ППН  $I_n$ ; початкове  $f_{\text{min}}$ , кінцеве  $f_{\text{max}}$  значення робочої частоти і крок зміни  $\Delta f$ ; початкове  $N_{\text{min}}$ , кінцеве  $N_{\text{max}}$  значення числа СК і крок зміни  $\Delta N$ ; наперед задане максимальне значення обсягу  $V_{\text{max}}$ , яке не повинно бути перевищено; параметри елементної бази, за якими формується банк елементної бази (блок 3).

Для порівняння одержуваного – на кожному кроці зміни частоти і числа силових каналів – поточного обсягу  $V_{\text{пот}}$  зі значенням, отриманим на попередньому кроці, у блоці 4 виконується відповідне

присвоєння.

**Крок 2.** Формування бажаних частотних і динамічних характеристик відповідно до п. 2 методики – (блок 5), визначення мінімальної частоти комутації  $f_{\min}$ .

**Крок 3.** Організація зовнішнього циклу зміни поточного значення робочої частоти  $f$ , на якій визначаються параметри ППН (блок 6). При цьому, початкове значення визначається в блоці 5, а максимальне значення  $f_{\max}$  і крок зміни робочої частоти  $\Delta f$  вибираються з урахуванням вищезазначених зауважень і сучасної елементної бази.

**Крок 4.** Організація внутрішнього циклу зміни кількості СК (блок 7). При цьому початкове, кінцеве значення числа СК, крок зміни визначаються (оцінюються) за результатами дослідження (знання діапазону зміни відносної частоти або коефіцієнта заповнення).

**Крок 5.** Для поточних значень  $f$ ,  $N$  обчислюються параметри електричних процесів, показники якості – по співвідношеннях відповідної математичної моделі [3 – 7]: абсолютні та відносні пульсації миттєвих струмів на вході  $\Delta I_{\text{пм}}$ ,  $K_{\text{пмм}}$  і виході  $\Delta I_{\text{вм}}$ ,  $K_{\text{вмм}}$  ППН; також визначаються аналогічні параметри по напрузі (блок 8).

**Крок 6.** Визначення втрат – блок 9.

**Крок 7.** Визначення значень ємності вхідного і вихідного фільтрів – співвідношення (4) – блок 10.

**Крок 8.** Визначення поточних значень геометричного – відповідно до співвідношення (2), і теплового – відповідно до (3) обсягів – блок 11.

**Крок 9.** Визначення поточного обсягу  $V_{\text{пот}}$  – залежно від результату умови блоку 12, відповідно до співвідношення (1) – блок 13 (або 14).

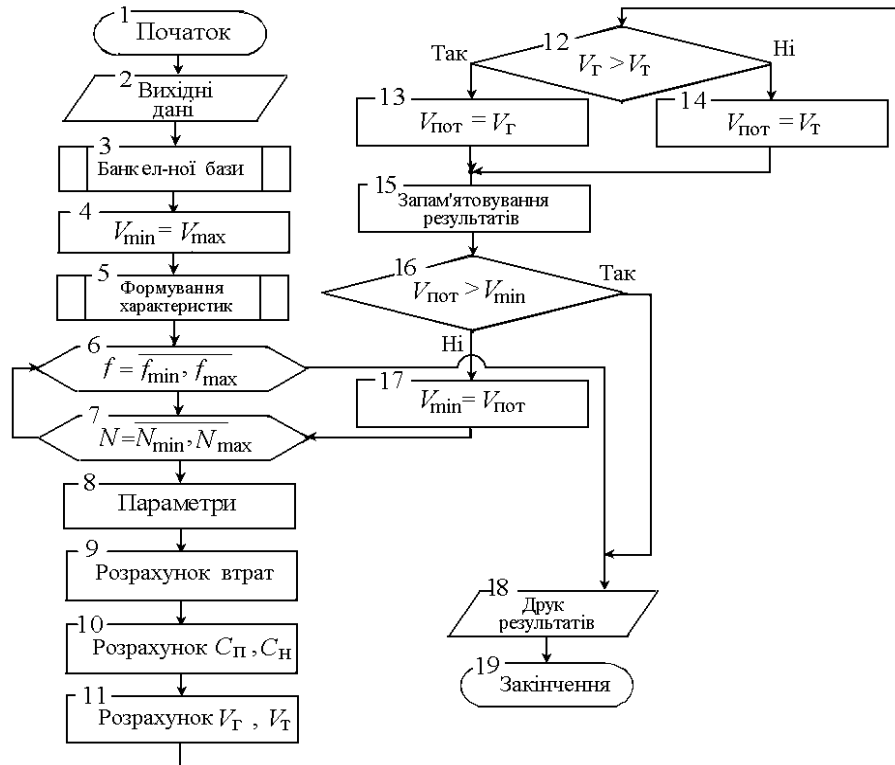


Рис. 3. Алгоритм проектування ППН

Далі результати розрахунків, виконаних в блоках 8 – 13 (14), запам'ятовуються (блок 15).

**Крок 10.** Перевірка умови виконання мінімізації поточного обсягу. На кожному кроці зміни параметрів  $f$ ,  $N$  визначається значення обсягу  $V_{\text{пот}}$  і порівнюється з його значенням  $V_{\min}$  на попередньому кроці (блок 16).

**Крок 11.** Фіксація поточного обсягу  $V_{\text{пот}}$  і запам'ятовування значень розрахованих параметрів (блок 17) – у разі зменшення  $V_{\text{пот}}$  на даному кроці.

Далі процес повторюється для наступного значення кількості СК (блоки 7 – 17).

**Крок 12.** У разі збільшення  $V_{\text{пот}}$  на даному етапі, процес пошуку мінімального обсягу закінчується, управління передається на виведення (друк) отриманих результатів (блок 17) –  $V_{\text{тк}}$ ,  $V_{\text{тк}}$ ,  $f$ ,  $N$ ,  $C_{\text{п}}$ ,  $C_{\text{н}}$  – після чого робота завершується (блок 18).

У разі  $V_{\text{пот}} < V_{\min}$  після досягнення кінцевого значення  $N_{\max}$ , змінюється значення робочої частоти  $f$

(блок 6), і розрахунок повторюється до тих пір, поки збільшення  $f$  не призведе до збільшення обсягу МПП ( $V_{\text{пот}} > V_{\text{мін}}$ ).

Таким чином, запропоновано методику автоматизованого проектування перетворювачів постійної напруги модульної структури за критерієм мінімального обсягу при забезпеченні заданої якості вихідної напруги, яка базується на результатах отриманих раніше досліджень. На базі запропонованої методики розроблено програмний алгоритм, компактний і зручний для реалізації на ЕОМ.

### Література

1. Закон України “Про телекомунікації” від 18.11.2003. – № 1280-IV // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2004, № 12, ст.155, із змінами згідно Закону № 1170-VII (1170 – 18 ) від 27.03.2014, ВВР, 2014, № 22, ст.816.
2. Закон України “ Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки” від 11.07.2001. – № 2623-III // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2001, № 48, ст.253, із змінами згідно Закону № 5460-VI (5460-17 ) від 16.10.2012, ВВР, 2014, № 2-3, ст.41.
3. Кадацький А.Ф. До дослідження несиметричних електричних процесів у багатофазних імпульсних перетворювачах /А.Ф. Кадацький, В.Г. Гурков, О.А. Грабовий, І.П. Малявін // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – №1. – С.27 – 34.
4. Кадацький А.Ф. Асимметрия электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры /А.Ф.Кадацкий, И.П. Малявин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. –№ 3 (75). – С.7 – 14.
5. Кадацький А.Ф. Анализ электрических процессов в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при граничных токах дросселей / А.Ф.Кадацкий, И.П. Малявин, А.В. Кочетков, О.В. Швец // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. –№ 2. – С.22 – 28.
6. Кадацький А.Ф. Анализ электрических процессов в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при безразрывных токах дросселей силовых каналов / А.Ф.Кадацкий, И.П. Малявин, А.А. Слинченко // Цифрові технології. – 2010. – № 8. – С. 44 – 56.
7. Кадацький А.Ф. Расчет параметров импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры с граничным режимом функционирования при асимметрии электрических процессов / А.Ф.Кадацкий, И.П. Малявин, А.П. Русу, Т.Н. Ерыкалина, О.В. Майстренко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. Частина 1. – 2014. – № 2. – С. 117 – 131.
8. Гурков В. Г. К методике автоматизированного проектирования многофазных импульсных преобразователей / В.Г. Гурков, И.П. Малявин //Системы и средства передачи и обработки информации (ССПОИ – 2004): труды VIII междунар. науч.-практ. конф., 4-9 сент. 2004 г.: тезисы докл. – Одесса, 2004. – ОНАС им. А.С. Попова. – С. 115.
9. Кадацький А.Ф. К методике автоматизированного проектирования многофазных импульсных преобразователей при асимметрии электрических процессов / А.Ф. Кадацкий, И.П. Малявин, А.А. Грабовой // Обробка сигналів і негауссівських процесів: Праці міжнар. наук.-практ. конф., 21 – 26 травн. 2007 р.: тези доповідей, Черкаси, 2007 р. – С.139 –141.

### References

1. Zakon Ukrainyini “Pro telekommunicacii” vid 18.03.2003. – № 1280-IV // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainyini (VVR). – 2004, № 12, st. 155, is zminami zgidno Zakonu № 1170-VII (1170 – 18) vid 27.03.2014, VVR, 2014, № 22, st.816.
2. Zakon Ukrainyini “Pro prioritetny napriami rozvitku nauki i tehniki” vid 11.07.2001. – № 2623-III // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainyini (VVR). – 2001, № 48, st. 253, is zminami zgidno Zakonu № 5460-VI (5460 – 17) vid 16.10.2012, VVR, 2014, № 2-3, st.41.
3. Kadatskyy A. F. Do doslidgennya nesimetrichnykh elektrichnykh procesiv u bagatofaznykh impul'snykh peretvoruvachah /A.F. Kadatskyy, V.G. Gurkov, O.A.Hraboviy, I.P. Malyavin // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2003. – №1. – С.27 – 34.
4. Kadatskyy A. F. Asimetriya electriceskikh processov v impul'snykh preobrazovatelyah postoyannogo napryageniya modul'noy struktury / A.F. Kadatskyy, I.P. Malyavin // Tehnologiya I konstruirovanie v elektronnoy apparature. – 2008. –№ 3 (75). – С.7 – 14.
5. Kadatskyy A. F. Analiz electriceskikh processov v mnogofaznykh impul'snykh preobrazovatelyah postoyannogo napryageniya pri granichnykh tokah drosseley / A.F. Kadatskyy, I.P. Malyavin, A.V. Kochetkov, O.V. Shvets // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2010. –№ 2. – С.22 – 28.
6. Kadatskyy A. F. Analiz electriceskikh processov v mnogofaznykh impul'snykh preobrazovatelyah postoyannogo napryageniya pri bezrazryvnykh tokah drosseley silovykh kanalov / A.F. Kadatskyy, I.P. Malyavin, A.A.Slinchenko // Cifrovi tehnologii. – 2010. – № 8. – С. 44 – 56.
7. Kadatskyy A. F. Raschet parametrov impul'snykh preobrazovatelyeh postoyannogo napryageniya modul'noy struktury s granichnym regimom funkcionirovaniya pri asimetrii electriceskikh processov / A.F. Kadatskyy, I.P. Malyavin, A.P. Rusu, T.N. Erikalina, O.V. Maystrenko // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. Chastina 1. – 2014. – № 2. – С. 117 – 131.
8. Gurkov V.G. K metodike avtomatizirovannogo proektirovaniya mnogofaznykh impul'snykh preobrazovatelyeh / V.G. Gurkov, I.P. Malyavin //Sistemy i sredstva peredachi i obrabotki informacii (CCPOI – 2004): Trudy III megdunar. Nauch.-prakt. konf., 4 - 9 sent. 2004 g.: tezisy dokl. – Odessa, 2004. – ONAZ im. O.S. Popova. – С. 115.
9. Kadatskyy A. F. K metodike avtomatizirovannogo proektirovaniya mnogofaznykh impul'snykh preobrazovatelyeh pri asimetrii electriceskikh processov / A.F. Kadatskyy, I.P. Malyavin, O.A.Hrabovoy // Obrobka signaliv i negaussivskih procesiv: Praci mignar. nauk.-prakt. konf., 21 – 26 travn. 2007 r.: tezy dopovidey, Cherkasy, 2007 r. – С.139 –141.

Рецензія/Peer review : 3.5.2015 р. Надрукована/Printed : 20.6.2015 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією