

УДК 621.311

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-117-128

АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

О.В. Кочетков

к.т.н., доцент кафедри

«Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»

В.М. Машін, Д.Ю. Криворучко, Т.О. Гаур

старші викладачі

кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»

С.М. Дранчук

к.т.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. У статті розглянуто методики та алгоритми автоматизованого дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (ППН) модульної структури, що поєднують одно- та багатofазний принципи перетворення.

Запропоновано інформаційну модель програмного комплексу, яка дозволяє досліджувати часові та енергетичні параметри ППН, визначати їхню ефективність та показники якості електричних процесів. Особливу увагу приділено створенню спеціалізованого програмного забезпечення, що реалізує розроблену узагальнену математичну модель та забезпечує гнучке налаштування параметрів (коефіцієнти накопичення, трансформації тощо). Доведено переваги виділення окремих підпрограм для розрахунку базових параметрів, часових залежностей, показників якості та енергетичних характеристик. Запропоновані алгоритми й програмні модулі дають змогу розширити обчислювальні можливості систем автоматизованого проектування, а також підвищити точність і надійність аналізу ППН із силовими каналами різного типу (понижуючого, підвищуючого, інвертуючого).

Ключові слова: імпульсні перетворювачі постійної напруги, модульна структура, програмний комплекс, автоматизоване дослідження, математична модель, енергетичні параметри, показники якості.

UDC621.311

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-117-128

**ALGORITHMS FOR AUTOMATED INVESTIGATION
OF MODULAR-STRUCTURE DC CONVERTERS**

O. Kochetkov

PhD, Associate Professor

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

V. Mashin, D. Krivoruchko, T. Gaur

Senior Lecturers

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

S. Dranchuk

PhD, 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 article examines methodologies and algorithms for the automated study of modular-structure DC-DC converters (DCC) that combine single-phase and multi-phase conversion principles.*

An informational model of a software suite is proposed, enabling the investigation of time-domain and energy parameters of DCC and the assessment of their efficiency and quality indicators of electrical processes.

Special attention is paid to the development of specialized software that implements the proposed generalized mathematical model and provides flexible parameter configuration (accumulation and transformation coefficients, etc.).

The advantages of separating the calculation tasks into individual subprograms covering basic parameters, time-domain dependencies, quality indicators, and energy characteristics are substantiated.

The proposed algorithms and software modules expand the computational capabilities of automated design systems while improving the accuracy and reliability of analyzing DCC with various types of power channels (buck, boost, and inverting).

Keywords. *DC-DC converters, modular structure, software suite, automated study, mathematical model, energy parameters, quality indicators.*

Вступ. Для вирішення завдань аналізу та досліджень у цьому розділі запропоновано методики, алгоритми, що дозволяють розробити програмне забезпечення для дослідження електричних процесів та енергетичних параметрів імпульсних перетворювачів постійної напруги (ППН) із силовими каналами (СК) понижуючого типу.

При дослідженні та проєктуванні радіотехнічних пристроїв широко використовуються системи автоматизованого проєктування (САПР) та віртуального моделювання на ЕОМ електронних схем, у тому числі перетворювачів постійної напруги.

Цей вид моделювання полягає у створенні та дослідженні електричної схеми за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що емітує її роботу на ЕОМ. При цьому немає значних матеріальних витрат на створення макета досліджуваного пристрою та вимірювальних приладів, а також це дає можливість проводити дослідження в критичних режимах (наприклад, при перевантаженнях), що сприяє більш глибокому аналізу режимів роботи пристрою. В даний час є велика кількість різних пакетів прикладних програм, що використовуються в інженерній практиці.

У процесі дослідження та проєктування електронних пристроїв зазвичай доводиться використовувати цілий набір таких програм. На етапі розробки структурної схеми застосовують такі відомі програми, як SysCalc, System View, SIMULINK, LabView. При створенні важливих схем – PSpice (у складі пакета DesignLab), Micro-Cap, Electronics Workbench, а при проєктуванні пристроїв НВЧ – спеціалізовані програми Super Compact, Touchstone і APLAC [1].

Існує ряд найбільш популярних і широко використовуваних на практиці спеціалізованих комп'ютерних програм – систем автоматизованого проєктування електронних пристроїв для моделювання процесів в електричних ланцюгах, таких як APLAC, DesignLab, System View, Electronic Workbench, Micro-Cap та інші [2].

Мета роботи. Зазначені програмні продукти дозволяють проводити інженерні дослідження, створити, редагувати принципові схеми і розрахувати ряд параметрів, розрахувати частотні характеристики і перехідні процеси, зробити різноманітний аналіз пристроїв, реалізовувати інші сервісні функції.

Однак, маючи деякі обмеження, такі програмні продукти не дозволяють повною мірою служити інструментом для дослідження перетворювачів напруги. При різних схемах перетворювачів (підвищуючий, понижуючий, чи інвертуючий) і різних режимах роботи потрібно з урахуванням розробленої математичної моделі.

Для цього доречно створення спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє проводити всі необхідні розрахунки на вирішення завдань автоматизованого дослідження і в подальшому проєктування ППН.

Викладення основного матеріалу. Розробка математичних моделей є першим етапом дослідження імпульсних ППН. Такі математичні моделі, викладені в роботах [1; 2; 3] дозволяють широко їх використовувати при автоматизованих дослідженнях та проєктуванні перетворювачів.

Зазначені моделі дозволяють замість тривалого відпрацювання на фізичних («реальних») макетах виконати дослідження ППН за допомогою програмного

забезпечення на ЕОМ. Ці моделі є узагальненими щодо режиму роботи (стабілізація та стеження), що сприяє спрощенню алгоритмів розрахунку параметрів електричних процесів та є однією з переваг зазначених моделей.

Проектування, у загальному випадку, представляє собою рішення завдання аналізу (дослідження) і синтезу ППН (з урахуванням отриманих результатів дослідження) при заданих техніко-економічних показниках.

Тобто результати дослідження, отримані при моделюванні локально використовувати при вирішенні завдань з проектування. Для проведення необхідних досліджень програмне забезпечення має забезпечувати дослідження перетворювачів при однофазному та багатофазному принципах перетворення електричної енергії, результати яких будуть використані при проектуванні з метою покращення техніко-економічних показників ППН.

Розроблені математичні моделі, викладені в [1; 2; 3], що описують електричні процеси в часовій області в окремому силовому каналі і перетворювачі в цілому, дозволяють будувати часові діаграми: струмів і напруг в елементах СК, в колах живлення і навантаження перетворювача при заданому режимі роботи, що дозволяє визначити величину миттєвих струмів у будь-який момент часу, а також їх максимальні та мінімальні значення, та величини відносних пульсацій напруг і струмів на вході та виході ППН відповідно при ОП та БП [3].

Моделі також дозволяють будувати залежності показників якості електричних процесів ППН і енергетичних параметрів від величини значення коефіцієнтів накопичення – k_n і трансформації – n_{21} , числа N СК. Зазначені залежності дозволяють виявити особливості електричних процесів (наприклад, при зміні режиму роботи) при інших незмінних параметрах (N , L_k , C_k) і оцінити ступінь впливу того чи іншого типу модульної структури з однофазним та багатофазним принципами перетворення при граничному режимі функціонування (рис. 1).

Змінюючи кількість силових каналів N , при побудові як часових діаграм струмів в колах живлення та навантаження БП, так і при побудові інших вищезазначених залежностей від величини коефіцієнта накопичення, можна виявити особливості і характер зміни досліджуваних параметрів.

Таким чином, основні завдання, які повинен вирішувати програмний комплекс, що розробляється, для дослідження ППН, наступні:

1. Дослідження параметрів електричних процесів перетворювачів постійної напруги (ОП та БП) у часовій області.
2. Дослідження показників якості електричних параметрів ППН.
3. Дослідження енергетичних параметрів ППН.

Під час розробки програмного комплексу ПК прийнято підхід – виділення окремих програмних модулів – підпрограм (ПП) для розрахунку параметрів, відповідних розв'язуваним завданням [1; 2; 3; 4; 5]. Це зумовлено тим, що основні обчислювальні процедури та операції, а також складові окремі етапи досліджень повинні бути взаємопов'язані і не дублюватися при вирішенні різних завдань дослідження, що сприяє скороченню обчислювальних операцій.

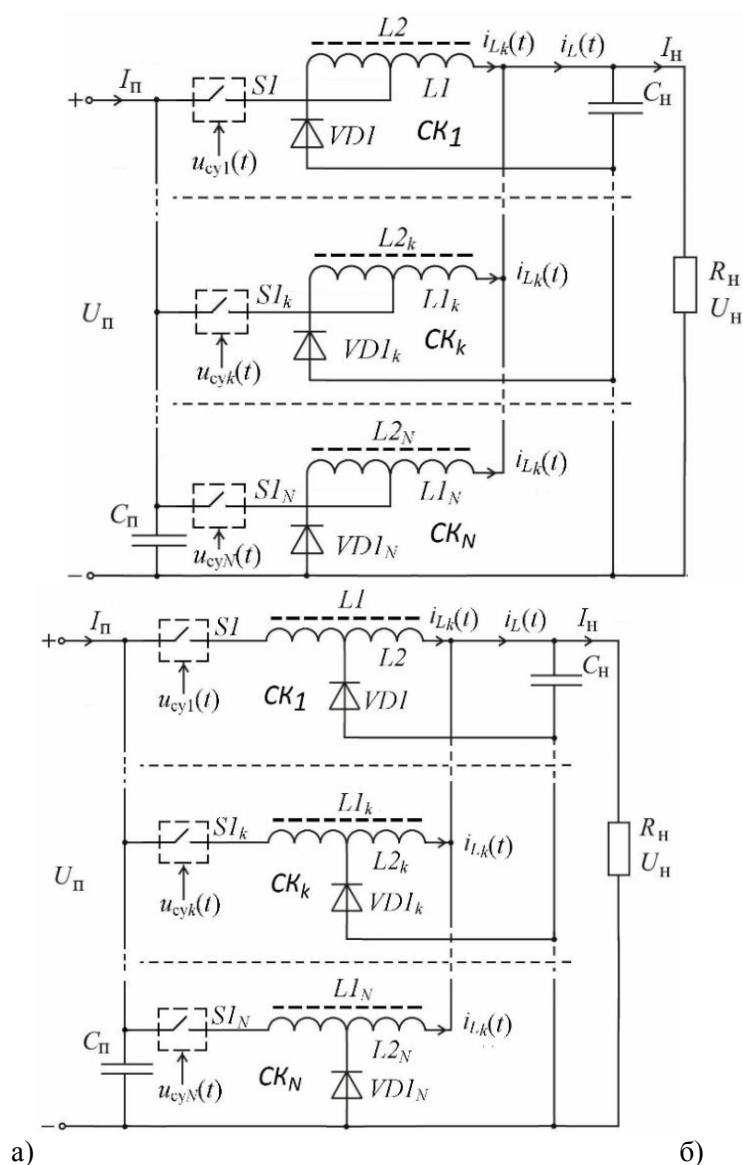


Рис. 1. ППН модульної структури при паралельному включенні СК понижуючого типу з коефіцієнтами трансформації а) $n_2 > 1$ б) $n_2 < 1$

Таким чином, єдиний програмний алгоритм можна подати як набір програмних модулів, який дозволить створити найбільш чітку та раціональну структуру програмного забезпечення ПЗ. В результаті можна сформулювати основні вимоги до програмного комплексу для дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (ОП та БП):

1. Рациональна структура інформаційної моделі ПЗ, що відображає інформаційні зв'язки між окремими ПП при вирішенні завдань дослідження, що сприяє скороченню часових витрат та коштів на розробку ПЗ.

2. ПЗ повинно забезпечувати дослідження ППН при різних параметрах елементів СК та вибраному режимі роботи (стабілізація, стеження) при ОІП та БІП.

3. Наявність окремого програмного модуля (керуючої програми) для управління роботою програмного комплексу (вибору завдань дослідження, зміни вихідних даних, що забезпечує інформаційні зв'язки між окремими ПП на заданому етапі дослідження), що використовують одні й ті самі вихідні дані та розрахункові співвідношення.

Відповідно до завдань, розв'язуваних програмним комплексом з дослідження електричних процесів у часовій області, показників якості та енергетичних параметрів ППН (рис. 2) [1-6] до результатів моделювання належать такі параметри:

Для дослідження часових залежностей – миттєві значення струмів і напруг у вхідних $i_{пк}(t)$, $u_{пк}(t)$ і вихідних $i_{нк}(t)$, $u_{нк}(t)$ колах окремо взятого k -го СК, їх сумарні значення для ППН $i_{оп}(t)$, $u_{оп}(t)$, $i_{он}(t)$, $u_{он}(t)$, для ОІП і $i_{мпк}(t)$, $u_{мп}(t)$, $i_{мн}(t)$, $u_{мн}(t)$ БІП.

Для дослідження залежностей показників якості електричних процесів ППН від значень коефіцієнтів накопичення та трансформації, величини вихідної потужності та числа силових каналів:

- абсолютні пульсації струмів при ОІП та МІП $\Delta I_{пк}$, $\Delta I_{нк}$, $\Delta I_{оп}$, $\Delta I_{он}$, $\Delta I_{мп}$, $\Delta I_{мн}$ та напруг $\Delta U_{пк}$, $\Delta U_{нк}$, $\Delta U_{оп}$, $\Delta U_{он}$, $\Delta U_{мп}$, $\Delta U_{мн}$, відповідно на вході та виході в СК та ППН при ОІП та БІП;

- коефіцієнти пульсацій струмів $K_{поп}$, $K_{пон}$, $K_{ппп}$, $K_{пмн}$ та напруг $K_{попи}$, $K_{пони}$, $K_{пппи}$, $K_{пмни}$ на вході та виході ППН при ОІП та БІП відповідно

- коефіцієнт згладжування перетворювача по струму S_i та напрузі S_u ;

- коефіцієнти згладжування структури на вході $S_{п}$, $S_{пи}$ і виході $S_{н}$, $S_{ни}$ по струму і напрузі;

- регулювальні характеристики $(U_{п}/U_{н} = f(\kappa_{н})$ чи $U_{н}/U_{п} = f(\kappa_{н}))$.

У даному випадку коефіцієнт згладжування визначається співвідношеннями $S_i = K_{пп}/K_{пн}$, $S_u = K_{ппи}/K_{пни}$ використовується для характеристики ефективності пригнічення змінних складових струмів або напруг у пристрої, що має ефект фільтрації (наприклад, випрямляч, перетворювач, фільтр), де $K_{пп}$, $K_{пн}$, $K_{ппи}$, $K_{пни}$ – коефіцієнти пульсацій відповідно вхідного та вихідного струму, напруги на вході та виході ППН.

Коефіцієнти згладжування структури перетворювача модульної структури в колах живлення $S_{п}$, $S_{пи}$ і навантаження $S_{н}$, $S_{ни}$ за струмом і напругою характеризують ефективність пригнічення змінних складових БІП, щодо аналогічного випадку ОІП у відповідних колах перетворювача. Для ОІП $S_{п} = S_{н} = 1$, $S_{пи} = S_{ни}$ [2]. Для БІП $S_{пм}$, $S_{нм}$ можна використовувати як показники, що характеризують ефективність згладжування – відносне зниження змінних складових в БІП порівняно з ОІП, виконаного з того ж числа N СК [2].

Для дослідження залежностей енергетичних параметрів необхідно визначити:

- діючі значення струмів на елементах $I_{Cnkд}, I_{Slкд}, I_{Llкд}, I_{VDlкд}, I_{L2кд}, I_{Ll2кд}, I_{Cnkд}$ СК, їх сумарні значення для ППН $I_{Slд}, I_{Llд}, I_{VDlд}, I_{L2д}, I_{Ll2д}$ і конденсаторів ОП і БП будуть різними (у БП менше максимальне значення відповідних струмів) та $I_{Cпмд} < I_{Cпод}$ и $I_{Cнмд} < I_{Cнод}$.

- втрати потужності на елементах СК $P_{Cnk}, P_{Slк}, P_{Llк}, P_{VDlк}, P_{L2к}, P_{Ll2к}, P_{Cnk}$, їх сумарні значення для ППН $P_{Sl}, I_{VDl}, P_{Ll}, P_{L2}, P_{Ll2}$, при цьому втрати потужності на конденсаторах вхідного і вихідного згладжування ($P_{Cм} = P_{Cпм} + P_{Cнм}$) $< (P_{Co} = P_{Cпо} + P_{Cно})$;

- коефіцієнти корисної дії силового каналу $\eta_{СКк}$ і перетворювача модульної структури при ОП $\eta_{ОП}$ і БП $\eta_{БП}$.

З викладеного, для наочності представимо завдання, розв'язувані розробленим програмним забезпеченням як інформаційної моделі, представлені на рис. 2.

При автоматизованому дослідженні електричних процесів імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури з автотрансформаторним включенням дроселя відповідно до інформаційної моделі (рис. 2) необхідно вирішувати наступні завдання:

1) дослідження параметрів електричних процесів у часовій області при різних коефіцієнтах трансформації n_{21} та накопичення кн;

2) дослідження впливу величини значень коефіцієнтів трансформації n_{21} та накопичення кн на показники якості електричних процесів (на абсолютні та відносні пульсації, на коефіцієнт згладжування структури) перетворювача;

3) дослідження впливу зміни числа N СК перетворювача на показники якості електричних процесів перетворювача.

4) дослідження впливу зміни зазначених параметрів на енергетичні показники ППН за різних режимів функціонування.

Відповідно до завдань дослідження ППН, виділено такі функції досліджуваних параметрів, які необхідні для оцінки якості електричних процесів, енергетичних характеристик в елементах СК, а також у вхідних та вихідних колах перетворювача:

1) функціями часу – $f(t)$;

2) функціями коефіцієнта накопичення – $f(kн)$;

3) функціями коефіцієнта трансформації – $f(n_{21})$.

Літерою f позначено функціональну залежність.

Для вирішення кожного із завдань автоматизованого дослідження використовується «Управляюча програма», універсальна програма [5], що керує обчислювальним процесом та введенням вихідних даних, висновком результатів розрахунку, у тому числі і побудовою графіків обраних залежностей, яка за допомогою програмних модулів, реалізованих у динамічній бібліотеці, що підключається.

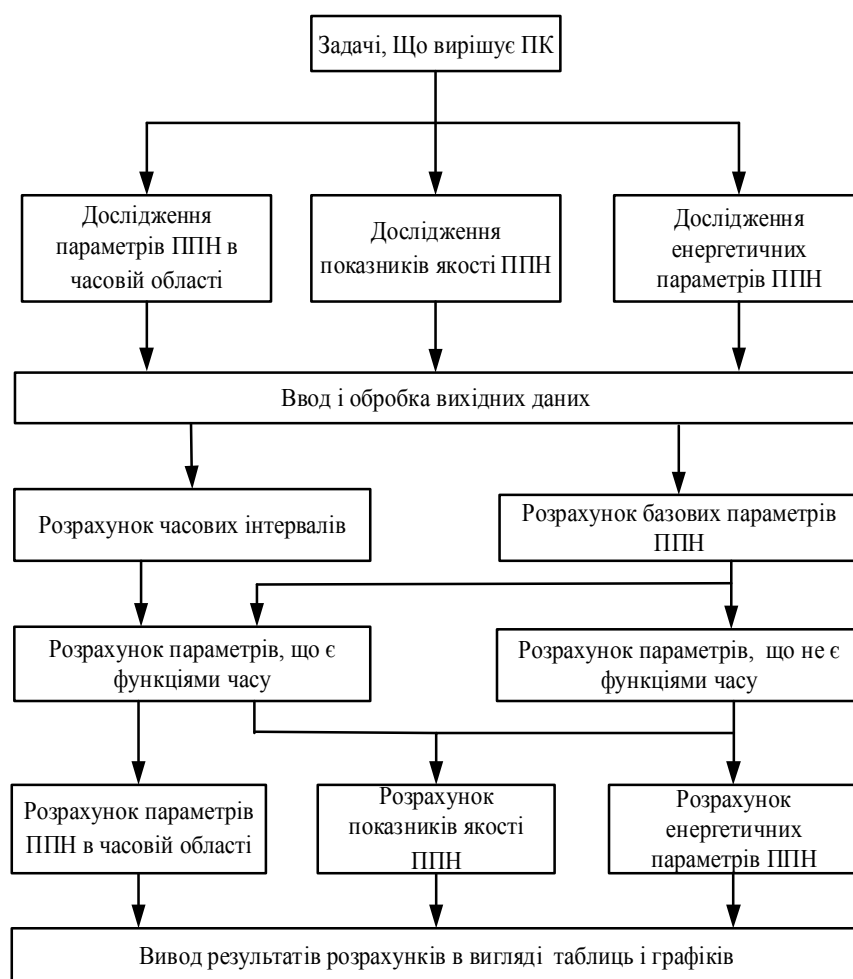


Рис. 2. Інформаційна модель програмного комплексу

Для того щоб виконати зазначені дослідження за допомогою розробленої математичної моделі з використанням ЕОМ, доцільно, на основі аналізу всіх розрахункових співвідношень і сформульованих завдань дослідження весь процес розрахунку електричних параметрів перетворювача розділити на ряд самостійних завдань.

Далі розподілити їх за видами досліджень (рис. 2) і розробити для кожної задачі дослідження алгоритм розрахунку, на базі якого написати програмне забезпечення у вигляді відповідних підпрограм. Після чого необхідно всі підпрограми об'єднати в єдиний програмний комплекс дослідження ППН, що складається з програмних модулів з різними завданнями, що вирішуються.

Розглянемо докладніше поставлені завдання з урахуванням прийнятого підходу – виділення окремих програмних модулів співвідношень до розрахунку базових параметрів, є загальними довільного виду досліджень.

Виділимо окремі підпрограми (ПП), які входять до складу алгоритму дослідження ППН (рис. 3) реалізованого у вигляді бібліотеки, що динамічно підключається:

1) ПП «Розрахунок базових параметрів» служить для попереднього розрахунку параметрів та підготовку їх як вихідні дані для розрахунку досліджуваних величин (бл. 3, рис. 3);

2) ПП «Часові залежності» для розрахунку часових діаграм (бл. 11, рис. 3) у колах силових каналів та на вході та виході перетворювача в цілому (рис. 1);

3) ПП «Показники якості» (бл. 10, рис. 3) для розрахунку залежностей від коефіцієнта накопичення (з можливістю зміни числа $N_{СК}$, бл. 5, рис. 3 та коефіцієнта трансформації n_{21} – бл. 6, рис. 3) показників якості електричних процесів ППН (абсолютних пульсацій, коефіцієнтів пульсацій, коефіцієнтів згладжування);

4) ПП «Енергетичні параметри» (бл. 9, рис. 3) для розрахунку діючих значень струмів у СК, перетворювачі, а також коефіцієнтів корисної дії при різних значеннях величини коефіцієнтів накопичення k_n та трансформації n_{21} , значення вихідної потужності P_n та різному числі N силових каналів ППН.

Алгоритм програмного комплексу дослідження ППН містить такі блоки та підпрограми.

Після початку роботи програми (бл. 1) алгоритму (рис. 3) у бл. 2 вводяться вихідні дані: параметри елементів, тип досліджень, вид залежності. Залежно від обраного типу дослідження, виду залежності в ПП (бл. 3) відбувається розрахунок базових параметрів, які використовуються у відповідних розрахунках (часових залежностей, показників якості або енергетичних параметрів) в СК або ППН.

У бл. 4 залежно від заданого виду досліджуваної залежності відбувається розгалуження обчислювального процесу: виконується бл. 5 якщо обрана залежність від коефіцієнта накопичення – $f(k_n)$, бл. 6, залежність від коефіцієнта трансформації – n_{21} та бл. 7, якщо обрано дослідження часових залежностей $f(t)$. Зазначені бл. 5, бл. 6, бл. 7 є початком відповідних циклів для обраного виду залежності. Наприклад, залежно від коефіцієнта накопичення – $f(k_n)$, в бл. 5 визначаються його мінімальне k_{nmin} і максимальне k_{nmax} значення, а також крок Δk_n , з яким змінюватиметься коефіцієнт накопичення. Точність розрахунку залежить від величини інтервалу кроку Δk_n . Зі збільшенням Δk_n похибка зростає. Зменшення Δk_n з метою збільшення точності розрахунку призводить до збільшення часу обчислень.

Висновки

1. Сформульовані вимоги до програмного комплексу для дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги; сформульовані завдання, які має вирішувати програмний комплекс, що розробляється; запропоновано інформаційну модель комплексу програмного забезпечення, що відображає зв'язки завдань дослідження з окремими програмними модулями.

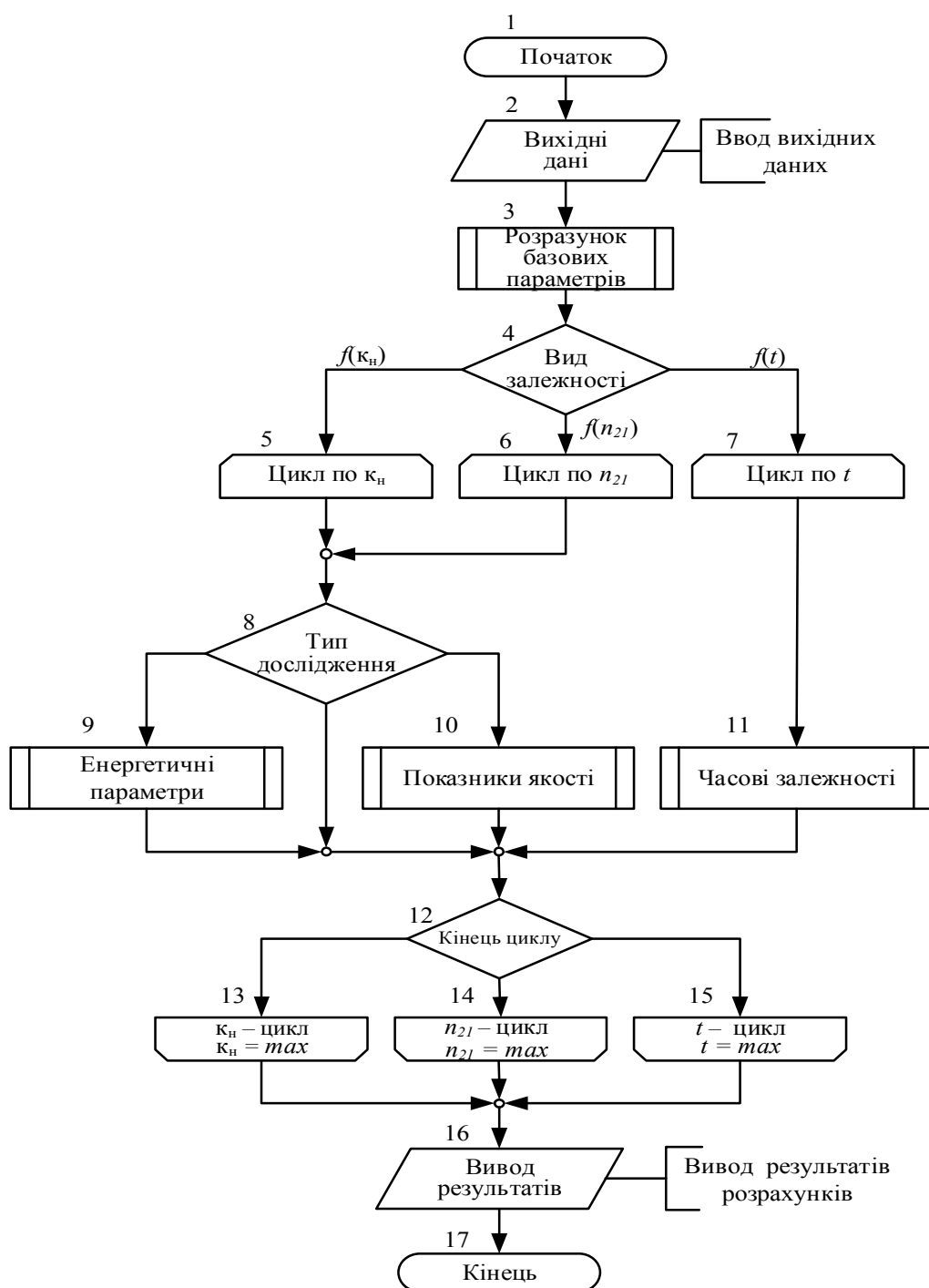


Рис. 3. Алгоритм дослідження ППН

2. Розроблено алгоритми розрахунку електричних процесів та енергетичних параметрів БПІ з СК понижуючого, підвищуючого та інвертуючого типу, що базуються на розробленій узагальненій математичній моделі для:

- розрахунку основних параметрів електричних процесів у силовому каналі;
- побудови часових залежностей у колах силових каналів і на вході та виході перетворювача в цілому;
- дослідження зовнішніх та регулювальних характеристик ППН.

3. Розроблено програмні модулі, що становлять обчислювальну основу алгоритмів дослідження електричних процесів та енергетичних параметрів у СК та перетворювачах модульної структури (БПІ, ОПІ) у часовій та частотній областях.

4. Алгоритми являють собою зручний інструмент для розв'язання завдань дослідження БПІ та ОПІ, що має підвищені обчислювальні можливості для аналізу БПІ, порівняно з існуючими, не призначеними спеціально для дослідження та моделювання БПІ, програмними комплексами для дослідження електричних схем (САПР).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Малявін І.П. Методика автоматизованого проектування багатофазних імпульсних перетворювачів постійної напруги. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2015, № 2, С. 84-88.
3. 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.
4. 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. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-2-64-74>
5. 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, 2025, № 1(75), С. 80-95. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-80-95>
6. 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. Gunchenko, Yu. O. (2012). Elektrychni parametry modulnykh peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy z hranichno-rozryvnym 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)
2. Maliavin I.P. (2015). Metodyka avtomatyzovanoho proektuvannia bahato-faznykh impulsnykh peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy [Technique of automated design of multiphase DC converters]. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, vol. 2, P. 84-88.
3. 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.
4. 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 funktsionuvannia [Results of the study of the quality indicators of electrical energy of DC converters in the boundary operating mode]. Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu, vol. 2(69), P. 64-74. (in Ukrainian).
5. Kochetkov O., Mashin V., Iovchev S., & Kharchenko, R. (2025). Enerhetychni parametry peretvoriuvachiv postiinnoi napruhy modulnoi struktury pry hranychnomu rezhymi funktsionuvannia. [Results of research indicators of electrical energy quality of dc voltage converters in the limit mode functioning]. Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu, vol. 1(75), P. 80-95. (in Ukrainian).
6. 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, vol.3, P. 7-21.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2025

Посилання на статтю: Кочетков О.В., Машин. В.М., Криворучко Д.Ю., Гаур Т.О., Дранчук С.М., Харченко Р.Ю., Алгоритми автоматизованого дослідження перетворювачів постійного напруги модульної структури // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 3 (77). С. 117-128. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-117-128.

Article received 03.02.2025

Reference a journal artic: Kochetkov O., Mashin V, Krivoruchko D., Gaur T., Dranchuk S., Kharchenko R. Algorithms for automated investigation of modular-structure dc converters // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 3 (77). P. 117-128. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-117-128.