

ДО ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

TO A RESEARCH OF ASYMMETRICAL ELECTRICAL PROCESSES  
IN PULSE CONVERTERS OF MODULE STRUCTURE

**Анотація.** Розглянуто особливості електричних процесів, методики й алгоритмів програмного забезпечення для дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури побудови при асиметрії електричних процесів за допомогою ЕОМ.

**Summary.** Features of electric process, technique and algorithms of program complex for research of pulse converters of a constant voltage are considered at symmetry and asymmetry of electric processes by computing simulation.

Відповідно до Програми реструктуризації ВАТ "Укртелеком" [1] для зниження собівартості послуг електрозв'язку передбачається здійснити заміну застарілого енергоємного устаткування та впровадження нових, більш рентабельних (у т.ч. енергозберігаючих) технологій, включаючи електроживлення телекомунікаційного обладнання.

Використання багатофазного принципу перетворення і регулювання електроенергії в імпульсних перетворювачах електричної енергії (ПЕЕ), виконаних із паралельно ввімкнених  $N$  однотипних взаємозамінних імпульсних ПЕЕ меншої потужності – силових каналів (СК) – забезпечення ненульового часового зміщення ( $t_{ck} \neq 0$ ) між електричними процесами в  $k$ -х СК і спільних електричних кіл (або вхідних, або вихідних, або і вхідних, і вихідних), в яких здійснюється підсумовування зміщених у часі електричних процесів (рис. 1) [2], дозволяє зменшити рівень змінних складових струмів (напруг) на вході і виході ПЕЕ. Це сприяє зменшенню обсягу і маси реактивних елементів вхідних і вихідних згладжуючих фільтрів ПЕЕ, а, отже, і системи електроживлення у цілому.

Пристрій, що реалізує зазначений принцип перетворення і регулювання електроенергії називається багатофазним імпульсним перетворювачем постійної напруги (БП), у той час як у ПЕЕ модульної структури з  $N$  СК (рис. 1) – однофазному імпульсному перетворювачі (ОП) часове зміщення між електричними процесами в  $k$ -х СК дорівнює нулю ( $t_{ck} = 0$ ) [2].

Ефективність фільтрації змінної складової в БП залежить від симетрії електричних процесів у СК, тобто від ідентичності електричних процесів в окремо узятих СК й їхнього рівномірного зміщення в часі щодо один одного.

Асиметрія електричних процесів у БП виникає при відхиленні режимів роботи окремо узятих силових каналів БП щодо усередненого режиму по будь-якому з параметрів, що характеризують імпульсний процес: періоду, амплітуді, коефіцієнтам накопичення, повернення і паузи, часовому зміщенню.

Симетрія електричних процесів у силових каналах БП порушується через технологічний розкид параметрів елементів СК, схеми управління, а також зміни їхніх параметрів при впливах різноманітних дестабілізуючих факторів.

Мета роботи - виявити особливості електричних процесів, методики й алгоритмів програмного забезпечення для дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури побудови (рис.1) при асиметрії електричних процесів за допомогою ЕОМ.

Для досягнення поставленої мети розроблені методика і програмне забезпечення (ПЗ) для розрахунку параметрів БП при асиметрії електричних процесів з використанням уніфікованої математи-

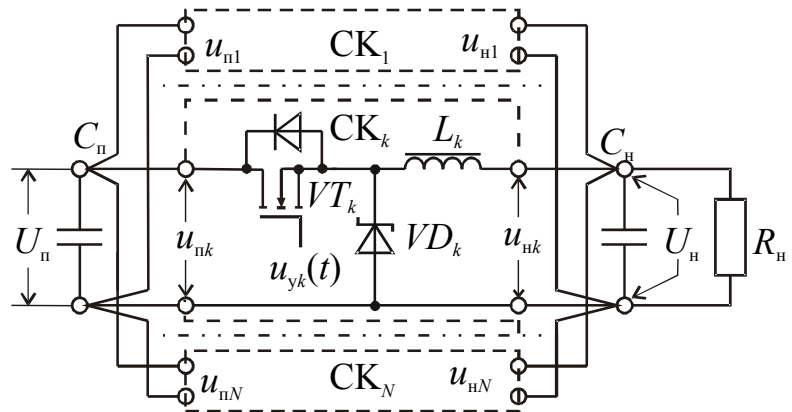


Рисунок 1 – ПЕЕ модульної структури

чної моделі [2], узагальненої щодо режимів роботи і різноманітних варіантів схемотехнічного виконання СК імпульсних перетворювачів постійної напруги.

Однією з основних задач, вирішуваних комплексом ПЗ, є [2] дослідження параметрів електричних процесів ПЕЕ в часовій області. Розв'язання даної задачі – побудова часових діаграм струмів основних елементів схеми: дроселя  $i_{L_{nk}}(t)$ , керованого ключа-транзистора  $i_{V_{Tk}}(t)$ , некерованого ключа-блокуючого діода  $i_{V_{Dk}}(t)$ ; струмів живлення  $i_{nk}(t)$  і навантаження  $i_{nk}(t)$ ; відповідних напруг на вході  $u_{nk}(t)$  і виході  $u_{nk}(t)$  при заданому режимі роботи силових каналів і ПЕЕ в цілому ( $i_n(t)$ ,  $u_n(t)$ ,  $i_n(t)$ ,  $u_n(t)$ ) – дозволяє наочно представити (побачити) електричні процеси, що відбуваються, в елементах схеми, визначити миттєвий струм (напругу) у будь-який момент часу, їх максимальні  $I_{nmax}$ ,  $I_{nmax}$  і мінімальні  $I_{nmin}$ ,  $I_{nmin}$  значення, абсолютні  $\Delta I_n$ ,  $\Delta I_n$  і відносні пульсації  $K_{nn}$ ,  $K_{nn}$  відповідно на вході і виході ПЕЕ, і на основі отриманих даних вибрати, зокрема, необхідний тип силових елементів (транзисторів, діодів), розрахувати конструктивні параметри моткових елементів (дроселів).

При розробці комплексу ПЗ прийнятий підхід – виділення окремих програмних модулів (ПМ) з наділенням їх функціями розрахунку параметрів, що відповідають вирішуваним задачам. Це обумовлено тим, що окремі етапи досліджень, а також основні обчислювальні процедури й операції повинні бути взаємозалежні наскрізним упорядкованим потоком оброблюваної інформації, непротирічним списком ідентифікаторів, єдиним середовищем програмування. За рахунок цього скорочується різноманітність розрахункових операцій, виключається дублювання. Завдяки такій уніфікації єдиний обчислювальний алгоритм – програмний комплекс – можна уявити як множину компонентів (програмних модулів), що дозволяє створити найбільш чітку і раціональну структуру ПЗ.

Використання при аналізі електричних процесів методів, заснованих на виборі як вихідних базових параметрів струму  $i_{L_{nk}}(t)$  дроселя силового згладжувального фільтра окремо узятото СК, параметра  $t_{nk}$  (і характеризуючого його у відносному вигляді коефіцієнта паузи  $k_{nk}$ ) і поточного часу  $t_k$

$k$ -го СК дозволяє розрахувати електричні, енергетичні, і в остаточному підсумку, конструктивні характеристики всіх елементів СК і ПЕЕ в цілому [2]. При цьому струми відповідно в колах живлення і навантаження ПЕЕ  $i_{no}(t)$ ,  $i_{no}(t)$  для однофазної і  $i_{nm}(t)$ ,  $i_{nm}(t)$  для багатозфазної структури ПЕЕ визначаються як [2]:

$$i_{no}(t) = i_{nm}(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N i_{nk}(t_k) & \text{для } y = 1, 3, 4, \dots, 8 \\ \sum_{k=1}^N i_{L_{nk}}(t_k) & \text{для } y = 2 \end{cases}; \quad i_{no}(t) = i_{nm}(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N i_{bk}(t_k) & \text{для } y = 2, 3, 5 \\ \sum_{k=1}^N i_{L_{nk}}(t_k) & \text{для } y = 1, 4, 6, 7, 8, \end{cases} \quad (1)$$

де «у» позначений тип СК (1 – знижуючий, 2 – підвищуючий, 3 – інвертуючий, 4 – з прямим включенням діода, 5 – зі зворотним включенням діода, 6 – з виводом середньої точки трансформатора, 7 – мостовий, 8 – напівмостовий)

$$i_{L_{nk}}(t_k) = \begin{cases} i_{nk}(t_k) = I_{mink} + I_{mk} t_k / t_{nk} & \text{при } t_{ck} \leq t \leq t_{ck} + t_{nk}; \\ i_{bk}(t_k) = I_{mink} + I_{mk} t_k [1 + (t_{nk} - t_k) / t_{bk}] & \text{при } t_{ck} + t_{nk} \leq t \leq t_{ck} + t_{nk} + t_{bk}; \\ i_{nk}(t_k) = 0 & \text{при } t_{ck} + t_{nk} + t_{bk} \leq t \leq T + t_{ck}, \end{cases} \quad (2)$$

для ОІП  $t_k = t$ ,  
для БІП

$$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} + T & \text{при } t - t_{ck} < 0; \\ t - t_{ck} & \text{при } 0 \leq t - t_{ck} < T; \\ t - t_{ck} - T & \text{при } t - t_{ck} > T. \end{cases} \quad (3)$$

Пульсації струмів в колах живлення  $\Delta I_n$  і навантаження  $\Delta I_n$  визначаються у вигляді [2]:

$$\Delta I_n = I_{nmax} - I_{nmin}, \quad \Delta I_n = I_{nmax} - I_{nmin}, \quad (4)$$

де  $I_{nmax}$ ,  $I_{nmax}$  – максимальні і  $I_{nmin}$ ,  $I_{nmin}$  – мінімальні значення струмів відповідно в колах живлення і навантаження ПЕЕ.

Коефіцієнти пульсацій струмів у колах живлення  $K_{nn}$  і навантаження  $K_{nn}$  ПЕЕ мають вигляд:

$$K_{nn} = \Delta I_n / 2I_n, \quad K_{nn} = \Delta I_n / 2I_n, \quad (5)$$

де  $I_n$ ,  $I_n$  – середні значення струмів споживання і навантаження перетворювача. Коефіцієнти згладжування ПЕЕ модульної структури в колах живлення  $S_n$  і навантаження  $S_n$  [2] характеризують ефективність придушення змінних складових у відповідних колах ПЕЕ. Для однофазної структури ПЕЕ  $S_{no} = S_{no} = 1$ . Для БІП  $S_{nm}$ ,  $S_{nm}$  можуть бути використані і як показники, що характеризують ефективність

згладжування змінних складових порівняно з однофазною структурою перетворення, виконаною також із  $N$  СК [2]:

$$S_{\text{пм}} = K_{\text{пшо}}/K_{\text{пмм}} = N \Delta I_{\text{нк}} / \Delta I_{\text{пм}} \quad S_{\text{нм}} = K_{\text{пшо}}/K_{\text{пмм}} = N \Delta I_{\text{нк}} / \Delta I_{\text{нм}} \quad (6)$$

З аналізу (1) – (6) випливає, що характер часових залежностей і абсолютні значення основних параметрів силових елементів (розмахи пульсацій  $I_{VTmk}$ ,  $I_{VDmk}$ , максимальні  $I_{VTmaxk}$ ,  $I_{VDmaxk}$  і мінімальні  $I_{VTmink}$ ,  $I_{VDmink}$  значення струмів транзистора і діода) цілком визначаються відповідними параметрами дроселя на інтервалах накопичення і повернення електроенергії:  $I_{VTmk} = I_{VDmk} = I_{mk}$ ;  $I_{VTmink} = I_{VDmink} = I_{mink}$ ;  $I_{VTmaxk} = I_{VDmaxk} = I_{maxk}$  (як приклад у табл. 1 [3] наведені основні співвідношення для ПЕЕ модульної структури з СК знижуючого типу, зображеного на рис. 1. З метою спрощення запису індекс « $k$ » опущений). Електричні процеси, що протікають у силових комутуючих елементах ПЕЕ: у дроселях  $L_{\text{нк}}$  силових згладжувальних фільтрів, керованих ключах-транзисторах  $VT_k$  і блокуючих діодів  $VD_k$ , є функціями параметрів електричної енергії – коефіцієнтів паузи  $\kappa_{\text{пк}}$ , накопичення  $\kappa_{\text{нк}}$  і повернення  $\kappa_{\text{вк}}$  і відповідними їм часовими інтервалами  $t_{\text{пк}}$ ,  $t_{\text{вк}}$  і  $t_{\text{нк}}$ , а також  $I_{\text{мк}}$  і  $I_{\text{мінк}}$ .

Отже, у програмному комплексі доцільний ПМ «Параметр» із наділенням функцій розрахунку основних параметрів струму дроселя  $k$ -го СК.

Таблиця 1 – Розрахункові співвідношення параметрів електричних процесів СК знижуючого типу

Параметр	Режим стабілізації	Режим спостереження
$\kappa_{\text{п}} = t_{\text{п}}/T$	$1 - \sqrt{g[1 + \bar{U}_{\text{н}} / (1 - \bar{U}_{\text{н}})]}$	$1 - \kappa_{\text{н}} (1 + \sqrt{1 + 4g / \kappa_{\text{н}}^2}) / 2$
$\kappa_{\text{н}} = t_{\text{н}}/T$	$\bar{U}_{\text{н}} (1 - \kappa_{\text{п}}) / [(1 - \bar{U}_{\text{н}}) + \bar{U}_{\text{н}}]$	$\kappa_{\text{с}}$
$\bar{U}_{\text{н}} = U_{\text{н}} / U_{\text{п}}$	$U_{\text{н}} / U_{\text{п}}$	$\kappa_{\text{н}} / (\kappa_{\text{в}} + \kappa_{\text{н}})$
$\kappa_{\text{в}} = t_{\text{в}}/T$	$1 - \kappa_{\text{н}} - \kappa_{\text{п}}$	
$I_{\text{м}}$	$(U_{\text{п}} - U_{\text{н}}) \kappa_{\text{н}} T / L_{\text{н}}$	
$I_{\text{мін}}$	$U_{\text{н}} / R_{\text{н}} (\kappa_{\text{н}} + \kappa_{\text{в}}) - 0.5 I_{\text{м}}$	
$I_{\text{VT}}$	$\kappa_{\text{н}} (I_{\text{мін}} + 0.5 I_{\text{м}})$	
$I_{\text{VD}}$	$\kappa_{\text{в}} (I_{\text{мін}} + 0.5 I_{\text{м}})$	
$I_{\text{л}}$	$\kappa_{\text{н}} (I_{\text{мін}} + 0.5 I_{\text{м}}) + \kappa_{\text{в}} (I_{\text{мін}} + 0.5 I_{\text{м}})$	
$I_{\text{п}}$	$\kappa_{\text{н}} (I_{\text{мін}} + 0.5 I_{\text{м}})$	
$I_{\text{мк}}$	$I_{\text{мін}} + I_{\text{м}}$	
$I_{\text{VTmax}}$	$I_{\text{мк}}$	

У загальному випадку досліджувані характеристики перетворювачів залежать й від розкиду параметрів елементів СК і інших дестабілізуючих факторів:

$$L_{\text{нк}} = L_k + \Delta L_{\text{нк}}, \quad t_{\text{чк}} = (k-1)T_{\text{п}} + \Delta t_{\text{чк}}, \quad U_{\text{пк}} = U_{\text{пк}} + \Delta U_{\text{пк}}, \dots \quad (7)$$

Симетрії електричних процесів відповідає рівність нулю відхилень  $\Delta L_{\text{нк}}$ ,  $\Delta t_{\text{чк}}$ ,  $\Delta U_{\text{пк}}$ ,  $\Delta I_{\text{пк}} \dots$

Зміна параметрів елементів  $k$ -го СК ПЕЕ призводить до зміни (відхилення) струму навантаження в  $k$ -му СК і перерозподілу струмів навантаження між СК порівняно з випадком ідентичних параметрів СК.

Струм навантаження (на виході) перетворювача  $I_{\text{н}}$  з урахуванням відхилень струмів  $\Delta I_{\text{нк}}$  у деяких  $k$ -х СК від їхніх середніх значень  $I_{\text{нк}}$  визначається в наступному вигляді [2]:

$$I_{\text{н}} = \sum_{k=1}^N I_{\text{нк}}, \quad \text{при } I_{\text{нк}} = \begin{cases} I_k + \Delta I_{\text{нк}} & \text{для } k = 1, 2, \dots, j \\ I_k - I_{\Sigma} / (N - j) & \text{для } k = j + 1, j + 2, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

де  $j$  – кількість СК, в яких відбулися відхилення  $\Delta I_{\text{нк}}$  струму навантаження СК  $I_{\text{нк}}$ ;  $I_k = I_{\text{н}}/N$  – струм на виході  $k$ -ого СК при  $\Delta I_{\text{нк}} = 0$  ( $k = \overline{1, N}$ );  $I_{\Sigma} = \sum_{k=1}^j \Delta I_{\text{нк}}$  – сумарне значення струму всіх  $j$  СК, в яких відбулося відхилення  $\Delta I_{\text{нк}}$ .

Як ілюстрації на рис. 2 наведені часові діаграми на виході окремих СК і БПП для випадку ідентичних параметрів СК (симетричний електричний процес) – рис. 2,а, і для випадку асиметрично-

го електричного процесу, коли в одному із  $N = 4$  СК відбулося зменшення значення індуктивності дроселя СК на 40% (рис. 2,б). Очевидно, що для даного прикладу у випадку симетрії електричних процесів миттєвий вихідний струм БП  $i_{\text{вм}}(t)$  має незначні пульсації  $\Delta I_{\text{в}}$  (рис. 2,а). При зменшенні значення індуктивності дроселя в 1-му СК ( $\Delta L_{\text{н1}} = -40\%$ ) миттєвий вихідний струм СК  $i_{\text{н1}}(t)$  (струм дроселя для СК знижуючого типу) набуває розривний характер (з'являється інтервал паузи  $t_{\text{н1}}$ ), його швидкість зміни (крутизна) стає відмінною від аналогічного параметра інших СК, у результаті чого значно зростають пульсації  $\Delta I_{\text{в}}$  вихідного струму перетворювача  $i_{\text{вм}}(t)$  (рис. 2,б). Видно, що при цьому з'являється додаткова низькочастотна складова, позначена  $i_{\text{нч}}(t)$ , період якої збігається з періодом комутації електричних процесів  $T$  [2].

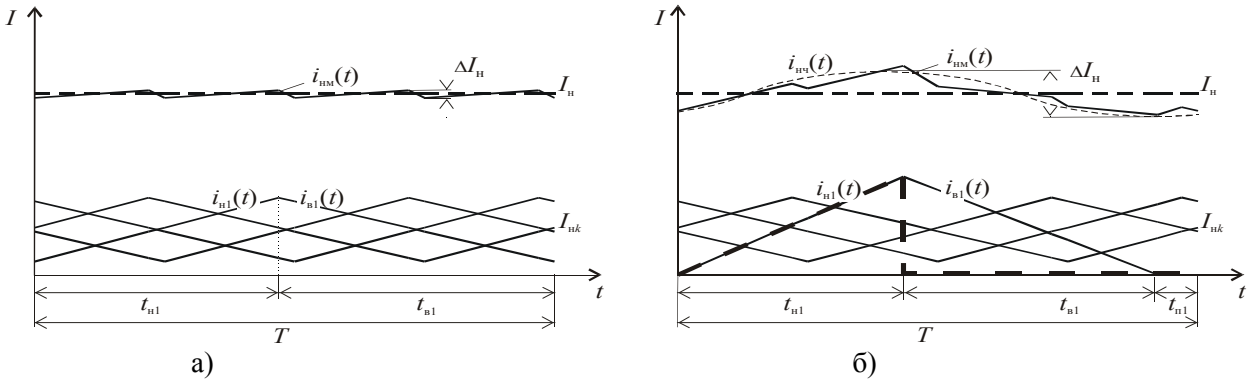


Рисунок 2 – Часові діаграми на виході окремих СК і БП у цілому для симетричного (а) і асиметричного (б) електричного процесу

На рис. 2,б жирною штриховою лінією показаний миттєвий вхідний струм 1-го СК  $i_{\text{н1}}(t)$  - струм  $i_{VT1}(t)$  керованого ключа-транзистора для СК знижуючого типу – відповідний миттєвому струму дроселя на інтервалі накопичення електричної енергії  $t_{\text{н1}}$  відповідно до (2).

Для урахування відхилень параметрів СК від ідентичних розроблено ПМ "Діалог", у якому вихідні дані, що вводяться, використовуються для розрахунку відповідно до співвідношень (7, 8).

На практиці при дослідженнях часових залежностей на ЕОМ поточний час, що виступає як аргумент, як правило, змінюється не безупинно, а дискретно з визначеним кроком  $dt$ . Причому, чим менше крок ( $dt \rightarrow 0$ ), тим точніші результати, але більше час розрахунку.

Найбільш простий шлях при моделюванні електричних процесів – обчислення з постійним кроком  $dt$  часових залежностей БП у моменти часу, що рівно відстоять один від одного (назвемо його "підхід 1"). Проте при такому підході точність розрахунку залежить від розміру інтервалу часу  $dt$ . Зменшення  $dt$  з метою збільшення точності розрахунку призводить до збільшення часу обчислень.

Найбільш "небезпечними" з точки зору точності є переходи від інтервалу накопичення до інтервалу повернення електричної енергії та навпаки.

При визначенні струмів у колах живлення для СК знижуючого й інвертуючого типів, що відповідають струму ключа-транзистора  $i_{VTk}(t)$ , 1-й підхід дасть значну похибку, що ілюструється рис. 2,б, де зазначений струм показаний жирною штриховою лінією. Аналогічна ситуація виникає при визначенні струмів у колах навантаження для СК підвищуючого й інвертуючого типів, що відповідають миттєвому струму блокуючого діода  $i_{VDk}(t)$ .

При лінійному характері зміни струму  $i_{Lnk}$  відповідно до (2) останній достатньо рахувати тільки у зазначених 4-х точках зміни станів: у точці початку інтервалу накопичення електричної енергії  $t_{ck}$ , у точці переходу від інтервалу накопичення до інтервалу повернення енергії  $t_{ck}+t_{nk}$ , у точці закінчення інтервалу повернення  $t_{ck}+t_{nk}+t_{bk}$  і в точці закінчення періоду комутації  $t_{ck}+T$  [4]:

$$t(m) = t_{ck}, \text{ при } m = k; \quad t(m) = t_{ck}+t_{nk}, \text{ при } m = k+N; \quad t(m) = t_{ck}+t_{nk}+t_{bk}, \text{ при } m = k+2N, \quad (9)$$

де  $k = 1, 2, \dots, N$  – поточний номер СК.

"Сумарна" досліджувана ( $i_{VTk}(t), i_{VDk}(t), i_{nk}(t), \dots$ ) часова залежність одержується шляхом з'єднання ("зшивання") значень функції (струму дроселя) у зазначених точках.

Відзначимо, що виконання розрахунків у відповідності з показаним 2-м підходом більш переважне. Наприклад, при  $Mt_1=100$  у випадку 4-х СК ( $N=4$ ) одержуваний виграш у часі складає величину  $n = Mt_2/Mt_1 = 5$  разів [4].

В загальному випадку для усунення неоднозначності визначення струмів у "особливих" точках, незалежно від досліджуваних типів СК як у колах живлення, так і навантаження, з'являється

необхідність у розрахунку значень миттєвого струму не в самих "особливих" точках, а в їх лівій і правій окози, тобто в шести часових точках:

$$\begin{aligned} t(m) &= t_{ck} + \Delta \quad (\Delta = dt_2 \text{ при } m=k, \Delta = -dt_2 \text{ при } m=k+N); \\ t(m) &= t_{ck} + t_{nk} + \Delta \quad (\Delta = dt_2 \text{ при } m=k+2N, \Delta = -dt_2 \text{ при } m=k+3N); \\ t(m) &= t_{ck} + t_{nk} + t_{bk} + \Delta \quad (\Delta = dt_2 \text{ при } m=k+4N, \Delta = -dt_2 \text{ при } m=k+5N). \end{aligned} \quad (10)$$

Для розрахунку моментів часу для побудови часових діаграм відповідно до зазначених підходів розроблено ПМ "Час".

Розглянуті ПМ "Параметр", "Діалог", "Час" є складовими частинами алгоритмів практично всіх видів досліджень, дозволяють розширити функціональні можливості алгоритмів, скоротити витрати машинного часу і забезпечити необхідну точність одержуваних результатів досліджень.

Дослідження електричних процесів ПЕЕ з однофазним і багатифазним принципами перетворення електричної енергії з використанням ПМ "Параметр", "Діалог", "Час" виконуються за допомогою управляючої програми, алгоритм якої наведений на рис. 3, а.

У блоці 2 здійснюється завдання масивів, констант і параметрів СК, що відповідають симетрії електричних процесів у СК. При необхідності зміни даних у діалоговому режимі користувач вводить значення наступних параметрів: тип ПЕЕ – ОП або БП; тип СК – знижуючий, підвищуючий, інвертуючий, з прямим включенням діода, зі зворотним включенням діода, з виводом середньої точки трансформатора, мостовий, напівмостовий; кількість СК у ПЕЕ –  $N$ ; режим роботи - стабілізація або спостереження: у режимі стабілізації вводиться напруга навантаження –  $U_n$  і струм навантаження ПЕЕ –  $I_n$ , у режимі спостереження – опір навантаження  $R_n$  і коефіцієнт заповнення  $k_3$ ; частота перетворення  $f$  (період комутації  $T$ ); для кожного СК ( $k=1, N$ ) вводяться напруга живлення -  $U_{nk}$ , індуктивність дроселя –  $L_{nk}$ , параметри елементів СК  $t_{ck}$ ,  $I_{nk}$ . Для визначення моментів часу в ПМ "Час" вводяться логічні ознаки визначення часових відліків для вхідних або вихідних кіл ("вхід/вихід") і використовуваного підходу ("підхід 1/підхід 2"): при використанні "підходу 1" вводиться  $Mt_1$  – максимальне число ітерацій, на який розбивається період  $T$  при розрахунку часових залежностей; при використанні "підходу 2" вводиться  $dt_2$  – округа "особливої" точки (інтервал часу):  $dt_2 < dt_1$ ,  $dt_2 \ll T$ .

Вибір типу досліджень – побудова тимчасових діаграм струмів у колах СК та ПЕЕ:  $i_{nk}(t)$ ,  $i_{nk}(t)$ ,  $i_{Lnk}(t)$ ,  $i_{VTK}(t)$ ,  $i_{VDk}(t)$ ,  $i_{no}(t)$ ,  $i_{nm}(t)$ ,  $i_{no}(t)$ ,  $i_{nm}(t)$  - здійснюється в діалоговому режимі в блоці 3 (ПМ «Діалог»). Якщо параметри повинні бути задані неідентичними, у ПМ «Діалог» вводяться відповідні відхилення параметрів  $\Delta L_{nk}$ ,  $\Delta t_{ck}$ ,  $\Delta U_{nk}$ ,  $\Delta I_{nk}$  і виконується перерахунок величин  $L_{nk}$ ,  $t_{ck}$ ,  $U_{nk}$ ,  $I_{nk}$  з урахуванням уведених відхилень відповідно до (7, 8). Для передачі уведених вихідних даних у наступні ПМ значення  $U_{nk}$ ,  $L_{nk}$ ,  $\Delta L_{nk}$ ,  $\Delta t_{ck}$ ,  $\Delta U_{nk}$ ,  $\Delta I_{nk}$ , ( $k=1, N$ ) розміщуються в  $N$ -мірних векторах.

Блоки 4 і 5, 6 і 7, ...,  $m$  і  $m+1$  (ПМ) реалізують виконання досліджень, що задаються в блоці 3. Особливістю керуючої програми рис. 3, а є можливість додавання ПМ для розв'язання нових дослідницьких задач. Блоки 4, 5 – функціонування програмного модуля для дослідження тимчасових залежностей:  $i_{nk}(t)$  (або  $i_{nk}(t)$ ,  $i_{Lk}(t)$ ,  $i_{VTK}(t)$ ,  $i_{VDk}(t)$ ,  $i_{no(m)}(t)$ ,  $i_{nm(m)}(t)$ ). Блоки 6, 7 – функціонування ПМ для дослідження залежностей показників якості від коефіцієнта заповнення  $k_3$  (або накопичення  $k_n$ ): абсолютних пульсацій струмів на вході  $\Delta I_n$  і виході  $\Delta I_n$  ПЕЕ, коефіцієнтів пульсацій  $K_{np}$ ,  $K_{nn}$  і згладжування структури  $S_{nm}$ ,  $S_{nm}$ . Блоки  $m$ ,  $m+1$  – функціонування ПМ для дослідження залежностей показників якості від зміни параметрів елементів схеми ( $N$ ,  $R_n$ ,  $L_{nk}, \dots$ ). Після завершення вибраного виду дослідження здійснюється перехід до блоку 3, де приймається рішення про виконання подальших, інших типів досліджень або завершенню роботи з програмою.

Алгоритм дослідження часових характеристик наведений на рис. 3,б. Він містить у собі описані ПМ "Параметр" – блок 3, "Час" - блок 4, а також ПМ "Канал" (блок 5). Результати досліджень – часові залежності  $i_{nk}(t)$  (або  $i_{nk}(t)$ ,  $i_{Lk}(t)$ ,  $i_{VTK}(t)$ ,  $i_{VDk}(t)$ ,  $i_{no}(t)$ ,  $i_{nm}(t)$ ,  $i_{no}(t)$ ,  $i_{nm}(t)$ ) виводяться на екран дисплея підпрограмою "Графік" – блок 6.

Функціонування алгоритму здійснюється наступним чином:

1. Початкові дані, необхідні для функціонування ПМ "Параметр", поступають від ПМ "Діалог". По співвідношеннях, наведених у [3] (нагадаємо, що в табл.1 наведені співвідношення для СК знижуючого типу), обчислюються значення  $k_{nk}$ ,  $k_{nk}$ ,  $k_{bk}$ ,  $t_{nk}$ ,  $t_{bk}$ ,  $t_{nk}$ ,  $I_{nk}$  і  $I_{mink}$ .

2. Далі виконується виклик ПМ "Час" (блок 4), призначеного для знаходження часових відліків (відповідно до зазначених вище підходів).

3. Розраховані в ПМ "Параметр" і в ПМ "Час" параметри електричних процесів використовуються як початкові дані для ПМ "Канал" (блок 5), де відповідно до (1-3) розраховуються, у зале-

жності від вибраного виду дослідження, часові діаграми струмів  $i_{nk}(t)$ ,  $i_{nk}(t)$ ,  $i_{Lk}(t)$ ,  $i_{VTrk}(t)$ ,  $i_{VDk}(t)$ ,  $i_{по(м)}(t)$ ,  $i_{по(м)}(t)$ , а також їх максимальні  $I_{пmax}$ ,  $I_{нmax}$  і мінімальні значення  $I_{пmin}$ ,  $I_{нmin}$ .

Початковими даними ПМ "Канал" є  $T$ ,  $N$ ,  $U_{пк}$ ,  $U_n$ ,  $I_{пк}$ , а також  $Mt_{1(2)}$  (при використанні підходу "1" або "2"). Поточний час  $t = m\Delta t$  ( $t$  змінюється від 0 до  $T$ ) при розрахунках змінюється дискретно з кроком  $\Delta t$ . Крім цього, вихідними даними підпрограми являються  $t_{пк}$ ,  $t_{вк}$ ,  $I_{пнк}$ ,  $I_{пк}$ . Для поточного моменту часу  $t$  (з кроком  $\Delta t$ ) на інтервалі  $T$  для кожного  $k$ -го СК провадиться розрахунок, наприклад,  $i_{Lk}(t)$  по співвідношеннях (2) з урахуванням поточного часу  $t_k$  (співвідношення 3).

Далі, при необхідності змінюються початкові дані в блоці 2 і здійснюється розрахунок аналогічно вище описаному або здійснюється повернення в основну програму з використанням блока 7 (рис. 3,б). Графічна інформація виводиться у вигляді часових залежностей  $i_{Lk}(t)$ ,  $i_{пн}(t)$ ,  $i_{он}(t)$ ,  $i_{пн}(t)$ ,  $i_{он}(t)$  при різноманітних параметрах елементів схеми, струмів навантаження, джерела первинного електроживлення.

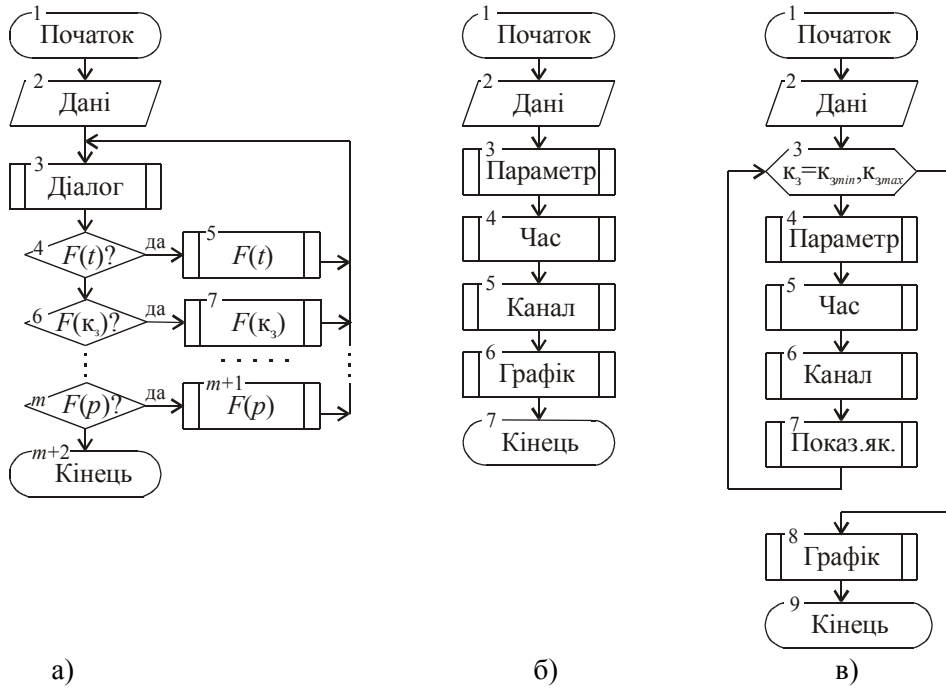


Рисунок 3 – Алгоритми керуючої програми (а), дослідження часових залежностей (б) і залежностей показників якості від коефіцієнта заповнення (в)

Дослідження залежностей (наприклад, пульсацій струмів, коефіцієнтів пульсацій і згладжування,...) від коефіцієнта заповнення  $k_3$  або накопичення  $k_n$  накладає свої обмеження на побудову алгоритмів програм. Оскільки число силових каналів  $N$  може бути в загальному випадку кожним від  $N_{min}$  до  $N_{max}$ , величина кроку  $\Delta k_3$  (або  $\Delta k_n$ ) зміни  $k_3$  (або  $k_n$ ) повинна бути функцією числа  $N$  з метою обчислення досліджуваних характеристик і в точках, кратних  $1/N$  (саме в цих точках ефективність фільтруючих властивостей БПП збільшується).

Програмний модуль для дослідження залежностей показників якості ( $\Delta I_n$ ,  $\Delta I_n$ ,  $K_{пн}$ ,  $K_{пн}$ ,  $S_{пн}$ ,  $S_{пн}$ ) від коефіцієнта заповнення виконаний за схемою рис. 3, в.

Нижче наведені результати, отримані за допомогою розглянутих ПМ.

Вплив відхилення струму навантаження  $I_{пк}$   $k$ -го силового каналу від середнього значення  $I_n/N$  на показники якості БПП показують залежності рис. 4, 5.

У випадках, коли відхилення  $\Delta I_{пк}$  струму  $I_{пк}$   $k$ -го СК не призводять до порушення безрозривного режиму роботи в силових каналах (рис. 5,б), змін у рівнях змінних складових на виході БПП не відбувається. Перехід одного або більш силових каналів у режим розривних струмів при відхиленні струму  $I_{пк}$  призводить до зміни (збільшення) рівнів змінної складової на виході БПП (рис. 5,в). Ступінь впливу відхилення струму  $I_{пк}$  на рівень змінної складової на виході БПП різноманітна: залежить від режиму роботи силових каналів (з розривним або безрозривним струмом) і кількості СК, що переходять від безрозривного в розривний режим роботи. Наприклад, при відхиленні у бік збільшення струму  $I_{пк}$   $k$ -го силового каналу ( $\Delta I_{пк} > \Delta I_{пн}$  – рис. 4,б для  $k_{п3}$ ) він переходить у безрозривний режим роботи, а інші  $(N-1)$  силових каналів – у розривний, а при відхиленні в бік зменшення струму  $I_{пк}$  ( $\Delta I_{пк} < \Delta I_{пн}$  – рис. 4,б для  $k_{п3}$ ) у ньому забезпечується розривний режим, а у  $(N-1)$  силових каналів – безрозривний.

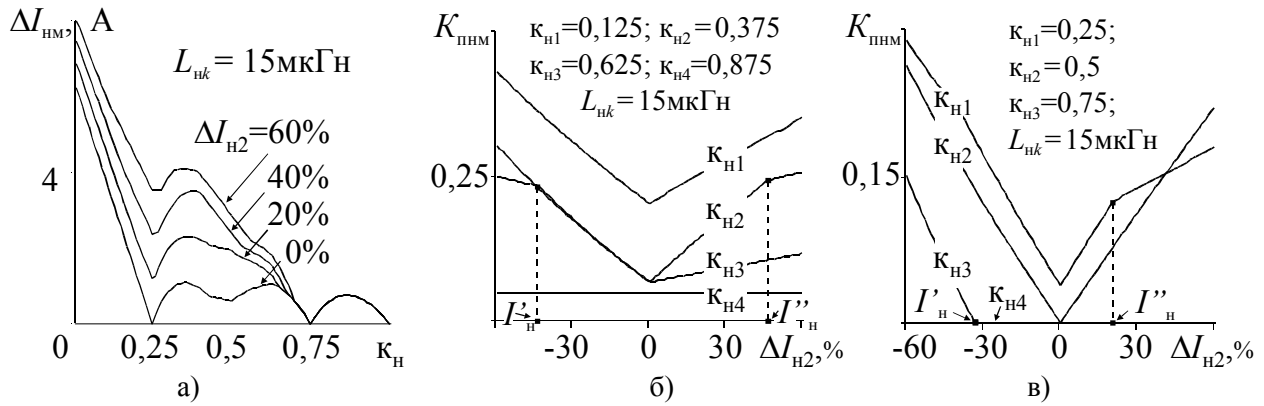


Рисунок 4 – Вплив відхилення струму  $\Delta I_{H2}$  в 2-му СК на  $\Delta I_H$  (а) і  $K_{PHM}$  (б, в) для  $I_H = 4A, U_H = 24V$

Відхилення  $\Delta I_{HK}$  одного силового каналу за рахунок наявності неагативного зворотного зв'язку по струму розподіляється між  $(N-1)$  силовими каналами рівномірно – відповідно зменшуючи або збільшуючи їхні струми на  $\Delta I_{HK}/(N-1)$ . Звідки видно (рис. 4,б), що коли відхилення струму  $\Delta I_{HK}$  припадає на розривний режим роботи одного СК, сильніше виявляється погіршення фільтруючих властивостей БПП порівняно з випадком, коли  $\Delta I_{HK}$  перерозподіляється на декілька СК, що працюють у розривному режимі.

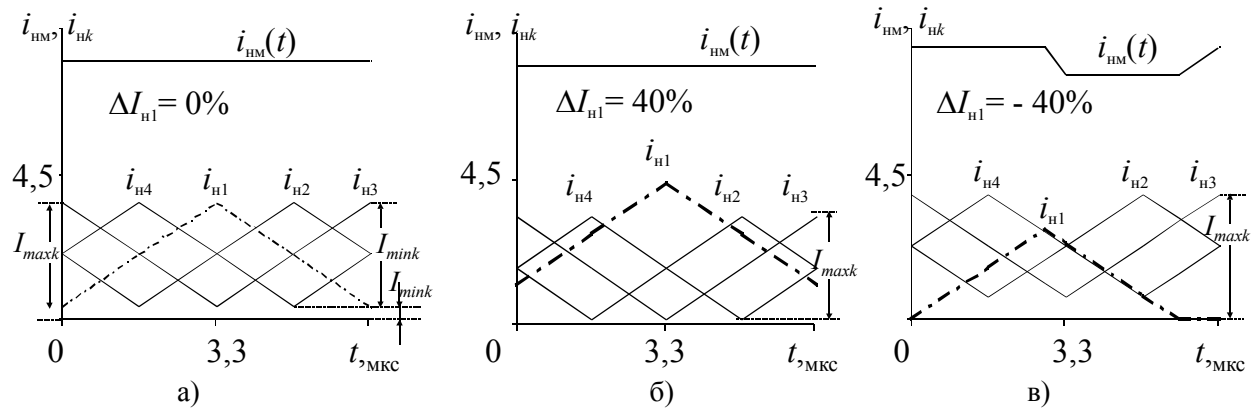


Рисунок 5 – Часові діаграми, які показують вплив відхилення струму  $\Delta I_{HK}$  на характер електричних процесів у БПП при  $N=4, L_{HK}=50 \text{ мкГн}, U_H=24V$

Відхилення струму навантаження  $I_{HK}$   $k$ -го силового каналу від середнього значення  $I_H/N$  впливають на характер процесів і на вході БПП (рис. 6). Кількість СК, що працюють з розривним або безрозривним струмами, тут впливає меншою мірою порівняно з виходом БПП.

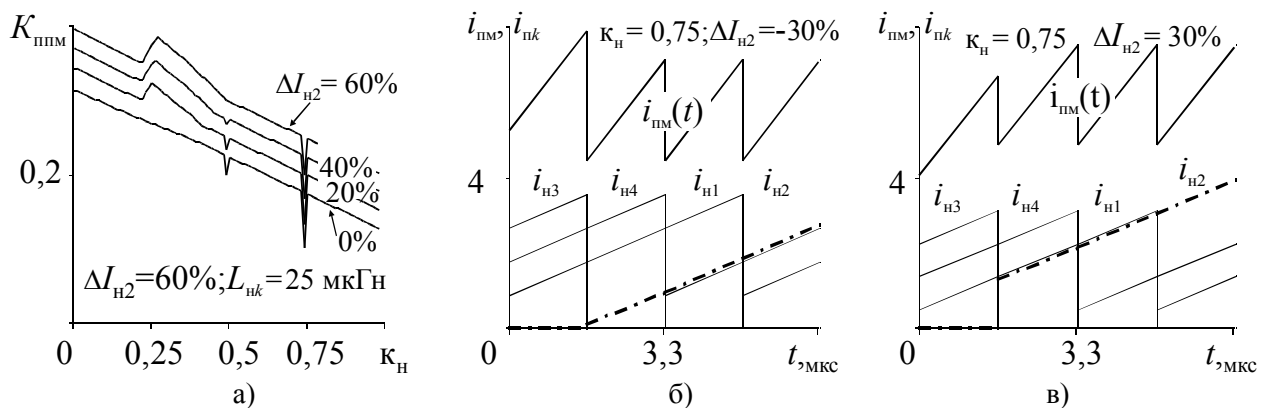


Рисунок 6 – Характер впливу відхилення струму  $\Delta I_{HK}$  на коефіцієнт пульсацій  $K_{PHM}$

на вході БПП (а) і часові діаграми при  $\Delta I_{н2} = -30\%$  (б) і  $\Delta I_{н2} = 30\%$  (в)

Результати досліджень показують, що при порушенні симетрії електричних процесів у силових каналах відбувається збільшення змінних складових на вході і виході БПП. Причому дане збільшення відбувається на частоті в  $N$  разів нижче (на частоті перетворення) порівняно з ідеальним випадком - симетрії електричних процесів. Проте і при порушенні симетрії електричних процесів зберігається ефективність використання багатофазного принципу перетворення порівняно з однофазними, як при відхиленні одного з параметрів у  $k$ -му силовому каналі, так і при відхиленнях одночасно декількох параметрів в одному або декількох силових каналах БПП.

### **Література**

1. Програма реструктуризації Українського об'єднання електрозв'язку "Укртелеком". Постанова КМУ № 1 від 04.01.1998 р.
2. Кадацький А.Ф. Гармонічний аналіз електричних процесів в багатофазних імпульсних перетворювачах постійної напруги з ШІМ-методом регулювання // *Електричество*. – 1997. – № 3.
3. Кадацький А.Ф. Електричні процеси в імпульсних перетворювачах постійної напруги // *Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова*. – 2001. – Вип. 2.
4. Кадацький А.Ф., Малявін І.П., Русаловський В.Б. До принципів формування часових інтервалів при моделюванні електричних процесів у перетворювачах постійної напруги // *Труди Міжнародної НТК «ССПОИ-2002»*. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова. – С.47.