

УДК 621.324

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.055>

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ УСЕРЕДНЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ В РЕЖИМІ ПЕРЕРИВЧАСТИХ СТРУМІВ В ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

**Ю.В. Руденко**, докт. техн. наук,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [rudenko@ied.org.ua](mailto:rudenko@ied.org.ua)

*Розглянуто засади методу усереднення в просторі станів із використанням теорем Лагранжа для розрахунку напівпровідникових перетворювачів постійної напруги, які працюють у режимах переривчастих струмів в індуктивних елементах. Для реалізації введеного в дослідженні припущення запропоновано заміну конденсатора у вихідних колах схеми заміщення перетворювача джерелом постійної е.р.с. Це дає змогу дістати спрощену математичну модель перетворювача для розрахунку інтегральних характеристик, яка відповідає сумісно-визначеній системі алгебраїчних рівнянь з усередненими змінними. З використанням розроблених моделей розраховано параметри понижувального, підвищувального та інвертувального перетворювачів, визначено аналітичні та графічні залежності граничних значень цих параметрів, які забезпечують заданий режим роботи. Отримані залежності дають можливість порівняння властивостей перетворювачів та вибору їхніх ефективних параметрів. Бібл. 10, рис. 3.*

**Ключові слова:** методи розрахунку та аналізу напівпровідникових перетворювачів, метод усереднення в просторі станів, перетворювачі постійної напруги.

Достатньо поширеними в роботі напівпровідникових перетворювачів постійної напруги є режими переривчастих струмів індуктивних елементів. Такі режими виникають у перетворювачах за певних параметрах навантаження, індуктивності індуктивних елементів та відносної тривалості інтервалів накопичення енергії в них. Відповідні величини накопиченої на попередніх інтервалах роботи енергії в індуктивних елементах перетворювача в процесі її передачі сприяють появі режимів відсікання, коли всі напівпровідникові елементи перебувають у закритому стані, що збільшує число інтервалів постійності структури – з'являються додаткові інтервали нульових струмів індуктивних елементів. Необхідність урахування та вибору тих чи інших режимів перетворювачів є актуальним завданням у процесі забезпечення їхньої надійної та ефективної роботи як із погляду впливу наскрізних струмів у елементах, що перемикають, так і динамічних втрат енергії в них під час перемикань.

Розроблений у роботах [1, 2, 3] метод аналізу на основі усереднення в просторі станів із використанням теорем Лагранжа дає змогу ефективно досліджувати багатоінтервальні процеси в перетворювачах, безпосередньо визначаючи їхні інтегральні характеристики та часові інтервали усталеного процесу. Такий метод передбачає отримання системи алгебраїчних рівнянь з усередненими змінними, що відповідає вихідним диференціальним рівнянням, які описують процеси в перетворювачах постійної напруги на всіх інтервалах його роботи. Подальше розв'язання системи алгебраїчних рівнянь для дослідження інтегральних характеристик перетворювача потребує визначення базису незалежних змінних, кількість яких має відповідати числу рівнянь системи. У такому разі отримана система алгебраїчних рівнянь має єдиний розв'язок, тобто є сумісно-визначеною [4].

Аналіз процесів у перетворювачах у режимах переривчастих струмів показує, що наявність інтервалу нульових струмів дроселя перетворювача призводить до зниження кількості реактивних елементів його схеми заміщення на цьому інтервалі та, відповідно, до зниження кількості диференціальних рівнянь на одиницю. Водночас кількість невідомих незалежних змінних алгебраїчної системи рівнянь, що отримується після усереднення змінних у диференціальних рівняннях, не відповідає кількості рівнянь. Це робить неможливим їхнє розв'язання, отримувана система алгебраїчних рівнянь втрачає статус сумісно-визначеної. Отже, наявність інтервалів із нульовими струмами індуктивних елементів вимагає визначення підходів для застосування цього методу під час дослідження перетворювачів, які працюють у режимах переривчастих струмів. Тому метою цієї роботи є спрощення математичних моделей перетворювачів постійної напруги для їхнього аналізу в режимах переривчастих струмів індуктивних елементів у разі використання методу усереднення в просторі станів на основі теорем Лагранжа.

Розглянемо для прикладу аналіз процесів у найпоширеніших схемах однокатних перетворювачів (рис.1), що працюють у режимі переривчастих струмів дроселя: перетворювачів понижувального (рис.1, а), підвищувального (рис.1, б) та інвертувального типів (рис.1, в). Часові діаграми струму дроселя  $i_L$ , змінної складової напруги на конденсаторі  $u_C$  та струму в ньому  $i_C$  на прикладі понижувального перетворювача в переривчастому режимі зображено на рис.1, г.

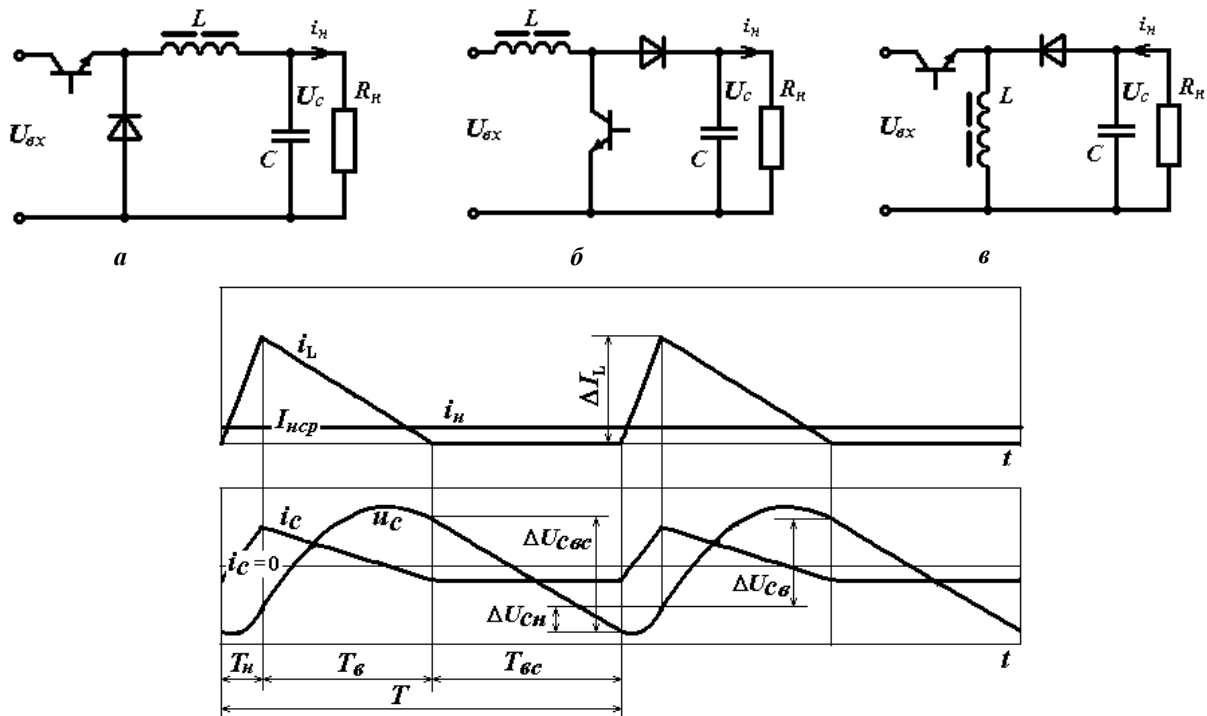


Рис. 1

У процесі аналізу припускаємо, що комутація елементів перемикання перетворювачів відбувається миттєво, їхні активні опори у відкритому стані дорівнюють нулю, активні опори обмоток дроселів дорівнюють нулю. Дослідимо процеси в понижувальному перетворювачі (рис.1, а). Як показано на рис.1, г, періодичний процес у перетворювачі з періодом комутації  $T$  охоплює інтервал накопичення енергії  $T_n$ , її віддачі  $T_v$  та інтервал відсікання енергії  $T_{вс}$ . На рис.1, г також позначено:  $\Delta I_L$  – приріст струму дроселя на інтервалах,  $\Delta U_{Cн}$ ,  $\Delta U_{Cв}$ ,  $\Delta U_{Cвс}$  – прирости напруги на конденсаторі на відповідних інтервалах.

Запишемо диференціальні рівняння, що описують процеси в схемах заміщення понижувального перетворювача на всіх інтервалах роботи:

$$\text{інтервал накопичення} \quad L \frac{di_L}{dt} + u_C = U_{вх}; \quad (1)$$

$$C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = i_L; \quad (2)$$

інтервал віддачі  $L \frac{di_L}{dt} + u_C = 0; \quad (3)$

$$C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = i_L; \quad (4)$$

інтервал відсікання  $C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = 0. \quad (5)$

Усреднюючи змінні системи (1) – (5), використаємо згідно з теоремами Лагранжа [5] такі співвідношення:

$$I_{Lcp} = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} i(t) dt, \quad U_{Ccp} = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} u(t) dt,$$

$$\left. \frac{di_L(t)}{dt} \right|_{cp} = I'_{Lcp} = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} i'_L(t) dt = \frac{i_L(t_b) - i_L(t_a)}{(t_b - t_a)},$$

$$\left. \frac{du_C(t)}{dt} \right|_{cp} = U'_{Ccp} = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} u'_C(t) dt = \frac{u_C(t_b) - u_C(t_a)}{(t_b - t_a)},$$

де  $I_{Lcp}$ ,  $U_{Ccp}$  – середні значення функцій змінних станів  $i_L(t)$  та  $u_C(t)$  на інтервалі від  $t_a$  до  $t_b$ ;  $t_b - t_a = \Delta T$  – тривалість інтервалів;  $i_L(t_b) - i_L(t_a) = \Delta I_L$ ,  $u_C(t_b) - u_C(t_a) = \Delta U_C$  – прирости функцій змінних станів на інтервалі.

Отже, алгебраїчні рівняння з урахуванням знаку приростів змінних станів на інтервалах мають такий вигляд:

$$L \frac{\Delta I_{Lcp}}{T_n} + U_{Ccpn} = U_{ax}; \quad (6)$$

$$C \frac{\Delta U_{Cn}}{T_n} + \frac{U_{Ccpn}}{R_n} = I_{Lcp}; \quad (7)$$

$$L \frac{\Delta I_{Lcp}}{T_g} - U_{Ccpг} = 0; \quad (8)$$

$$C \frac{\Delta U_{Cг}}{T_g} + \frac{U_{Ccpг}}{R_n} = I_{Lcp}; \quad (9)$$

$$C \frac{\Delta U_{Cвс}}{T_{вс}} - \frac{U_{Ccpвс}}{R_n} = 0. \quad (10)$$

У рівняннях (6) – (10) у позначеннях середніх значень та приростів функцій індекси «н», «г», «вс» відповідають інтервалам накопичення, віддачі та відсікання енергії відповідно. Прирости та середні значення струму дроселя на інтервалах накопичення та віддачі мають однакові значення, тому їх замінено однією змінною. Середні значення напруги на конденсаторі та її прирости на інтервалах комутації перетворювача, як ілюструють часові діаграми рис.1, 2, не є рівними між собою, тому не можуть бути замінені єдиними змінними на періоді комутації. Через це кількість невідомих в отриманій системі має 10 змінних, до яких належать приріст струму дроселя та прирости напруги на конденсаторі і їхні середні значення на інтервалах. Це означає, що отримана система (6) – (10) з п'яти рівнянь містить у собі 10 змінних, тому не є сумісно-визначеною, тобто не має єдиного розв'язку.

Як показує аналіз отриманих рівнянь, одним з ефективних шляхів спрощення системи з усередненими змінними (6) – (10) є введення припущення про те, що за достатньо великих

значень ємності конденсатора  $C$  прирости напруги конденсатора на інтервалах дорівнюють нулю  $\Delta U_C = 0$ , а середні значення напруги на інтервалах є однаковими та рівними постійній величині  $U_C$ . Таке припущення є коректним через те, що великі значення ємності конденсатора зазвичай використовується для зменшення пульсацій (максимальної амплітуди змінної складової) вихідної напруги перетворювача. Причому меншим пульсаціям напруги на конденсаторі, як ілюструють діаграми рис. 1, з, відповідають ще менші прирости цієї напруги на інтервалах.

Отже, вводячи припущення про  $\Delta U_C = 0$ , рівняння (7) та (9) виключаються з отриманої системи з усередненими змінними. Але застосування цього припущення до рівняння (10) призводить до втрати інформації про процеси в перетворювачі на інтервалі відсікання, що є неприпустимим. З іншого боку, член із приростом функції  $\Delta U_{C_{срвс}}$  у рівнянні (10) визначає, згідно з теоремою Лагранжа про середнє значення похідної функції [5], середній струм конденсатора на інтервалі відсікання:

$$I_{C_{срвс}} = C \left. \frac{du_C(t)}{dt} \right|_{срвс} = C \frac{1}{T_{срвс}} \int_{T_{срвс}} u'_{C_{срвс}}(t) dt = C \frac{\Delta U_{C_{срвс}}}{T_{срвс}},$$

де  $u'_{C_{срвс}}(t)$  – похідна функції напруги конденсатора на інтервалі відсікання. Як слідує з теореми, середній струм конденсатора на цьому інтервалі визначається лише приростом напруги конденсатора на інтервалі, його ємністю, тривалістю інтервалу та не залежить від початкових умов напруги на інтервалі, і тому таке визначення є самодостатнім. Причому, згідно з рівнянням (10), значення середнього струму конденсатора на інтервалі відсікання дорівнює середньому струму навантаження на цьому ж інтервалі:  $I_{C_{срвс}} = U_{C_{срвс}} / R_n = I_{нсрвс}$ . Це також слідує з того, що миттєві значення струму конденсатора на інтервалі відсікання збігаються з миттєвими значеннями струму навантаження згідно з рівнянням (5), що зі свого боку визначається схемою заміщення перетворювача на інтервалі відсікання та ілюструється діаграмами відповідних струмів на рис. 1, з. Необхідно відмітити, що в усталеному режимі середній струм навантаження на всіх інтервалах роботи перетворювача є однаковим та дорівнює середньому струму навантаження на періоді комутації. Отже, на інтервалі відсікання виконується рівність  $I_{нсрвс} = I_{нср}$ , де середній струм навантаження  $I_{нср}$  можна визначити для понижувального перетворювача за параметрами середнього струму дроселя на всьому періоді комутації (рис. 1, з):

$$I_{нср} = \Delta I \frac{T_n + T_e}{2T} = \frac{U_C}{R_n}. \quad (11)$$

У такому разі за введеного припущення  $\Delta U_C = 0$  схемам заміщення понижувального перетворювача на трьох інтервалах роботи відповідатиме така спрощена система рівнянь з усередненими змінними:

$$\begin{cases} L \frac{\Delta I}{T_n} + U_C = U_{вх}; \\ L \frac{\Delta I}{T_e} = U_C; \\ I_{нср} = \Delta I \frac{T_n + T_e}{2T} = \frac{U_C}{R_n}. \end{cases} \quad (12)$$

Розглянемо реалізацію припущення про  $\Delta U_C = 0$  під час аналізу процесів через введення ідеального джерела постійної е.р.с. з напругою  $U_C$  замість конденсатора у вихідному колі схем заміщення перетворювача. На рис. 2 показано схеми заміщення підвищувального перетворювача з джерелом постійної е.р.с. у вихідному колі на інтервалі накопичення енергії (рис. 2, а), її віддачі (рис. 2, б) та відсікання (рис. 2, в).

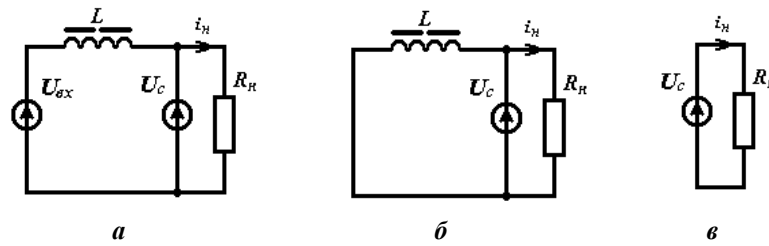


Рис. 2

Ці схеми заміщення зображають процеси в пристрої щодо лише однієї змінної – струму дроселя з урахуванням змінної складової, що протікає через джерело  $U_C$ , та постійної складової, яка визначається струмом навантаження  $i_n = U_C/R_n$ . У такому випадку схемам заміщення відповідає спрощена система диференціальних рівнянь лише з двох диференціальних рівнянь для першого та другого інтервалів, до якої необхідно додати співвідношення для струму навантаження:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} + U_C = U_{ox}; \\ L \frac{di_L}{dt} + U_C = 0; \\ i_n = U_C/R_n. \end{cases}$$

Третє співвідношення цієї системи відображає інформацію про струм навантаження на всіх інтервалах, у тому числі на інтервалі відсікання енергії. Застосування до цих виразів процедури усереднення на основі теорем Лагранжа дає змогу безпосередньо перейти до спрощеної системи з усередненими змінними (12), яка є сумісно-визначеною.

Отже, наведені міркування дають можливість формалізувати застосування методу усереднення в просторі станів на основі теорем Лагранжа, використовуючи процедуру заміни конденсатора у вихідних колах схем заміщення перетворювача джерелом постійної е.р.с. з напругою  $U_C$  на всіх інтервалах роботи. Це дає змогу, реалізуючи припущення про  $\Delta U_C = 0$ , спростити початкову систему диференціальних рівнянь до двох виразів згідно зі схемами заміщення з джерелом постійної е.р.с. замість конденсатора, додаючи до них співвідношення  $U_C/R_n = i_n$ . Виконуючи усереднення змінних у спрощеній системі диференціальних рівнянь, безпосередньо дістаємо спрощену підсумкову систему (12), у якій середній струм навантаження понижувального перетворювача визначається виразом (11). За відомих заданих величин індуктивності дроселя  $L$ , опору навантаження  $R_n$ , тривалості інтервалу накопичення  $T_n$ , вхідної напруги  $U_{ox}$  невідомими змінними системи трьох алгебраїчних рівнянь (12) є три параметри:  $\Delta I$ ,  $U_C$ ,  $T_e$ . Ця система є сумісно-визначеною та має єдиний розв'язок щодо вказаних змінних. Розв'язком вказаної системи (12) є такі вирази:

$$\Delta I = \frac{\phi_1}{2 + \phi_1} \cdot \frac{T_n U_{ox}}{L}, \quad U_C = \frac{2}{2 + \phi_1} \cdot U_{ox}, \quad T_e = \phi_1 \cdot \frac{T_n}{2}, \quad (13)$$

де  $\phi_1 = \sqrt{1 + 8\rho/K_3^2} - 1$ ,  $\rho = \tau/T$ ,  $\tau = L/R_n$ ,  $K_3 = T_n/T$  – відносна тривалість інтервалу накопичення енергії дроселем (коефіцієнт заповнення імпульсів керування).

Однією з переваг методу усереднення з використанням теорем Лагранжа [1–3], як порівняти з наявними близькими до нього методами [6–10], є можливість визначати невідомі тривалості інтервалів постійності структури перетворювача в усталеному режимі. Це дає змогу досліджувати властивості перетворювачів. Так, під час аналізу процесів у перетворювачах інформація про тривалість інтервалу віддачі енергії  $T_e$  дає змогу визначити умову існування режимів переривчастих струмів дроселя. Такою умовою для перетворювачів рис.1 є такий вираз:

$$I_{Lcp} < \Delta I/2, \quad (14)$$

де  $I_{Lcp}$  – середній струм дроселя.

У понижувальному перетворювачі середній струм дроселя дорівнює середньому струму навантаження  $I_{нсп}$ . Тому, підставляючи в умову (14) визначені параметри (13), дістанемо таку нерівність, що відображає зону параметрів, які відповідають режиму переривчастого струму дроселя в понижувальному перетворювачі:

$$\rho < \frac{1 - K_3}{2}. \quad (15)$$

Отримана умова (15) визначає залежність співвідношення між постійною часу  $\tau$  кола схеми заміщення перетворювача та періодом комутації  $T$ , що забезпечує безперервний або переривчастий режим струму дроселя в діапазоні керування  $K_3$ .

Для підвищувального перетворювача (рис.1, б) диференціальні рівняння, що описують процеси на інтервалах, мають такий вигляд:

$$\begin{array}{ll} \text{інтервал накопичення} & L \frac{di_L}{dt} = U_{ex}; \\ & C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = 0; \\ \text{інтервал віддачі} & L \frac{di_L}{dt} + u_C = U_{ex}; \\ & C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = i_L; \\ \text{інтервал відсікання} & C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = 0. \end{array}$$

Після усереднення змінних вказаних диференціальних рівнянь з урахуванням заміни конденсатора джерелом постійної е.р.с. та знаку приросту струму на інтервалах дістанемо алгебраїчні рівняння для підвищувального перетворювача на всіх інтервалах роботи:

$$\begin{cases} L \frac{\Delta I}{T_n} = U_C; \\ -L \frac{\Delta I}{T_e} + U_C = U_{ex}; \\ I_{нсп} = \Delta I \frac{T_e}{2T} = \frac{U_C}{R_n}. \end{cases} \quad (16)$$

Розглядаючи процеси в понижувальному перетворювачі, можна помітити, що струм навантаження на інтервалі відсікання енергії визначається загальним середнім струмом діода на всьому періоді. Це показано третім рівнянням системи (16).

Розв'язуючи систему алгебраїчних рівнянь (16), запишемо вирази для визначення характеристик процесів у підвищувальному перетворювачі:

$$\Delta I = \frac{T_n U_{ex}}{L}, \quad U_C = \frac{\phi_{II}}{2} \cdot U_{ex}, \quad T_e = \phi_{II} \cdot \frac{\tau T}{T_n}, \quad (17)$$

де  $\phi_{II} = \sqrt{1 + 2K_3^2 / \rho} + 1$ .

Для визначення умови (14) існування режиму переривчастих струмів у підвищувальному перетворювачі помітимо, що середній струм дроселя в ньому описується виразом (11). Тому для підвищувального перетворювача зона параметрів, що відповідає режиму переривчастих струмів дроселя, записується після відповідних підстановок виразів (17) в умову (14) так:

$$\rho < \frac{K_3^3 + K_3}{2} - K_3^2. \quad (18)$$

Розглянемо процеси в інвертувальному перетворювачі (рис. 1, в). Диференціальні рівняння, що описують процеси в ньому на інтервалах накопичення, віддачі та відсікання енергії, мають вигляд:

$$\begin{aligned} \text{інтервал накопичення} \quad & L \frac{di_L}{dt} = U_{ex}; \\ & C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = 0; \\ \text{інтервал віддачі} \quad & L \frac{di_L}{dt} + u_C = 0; \\ & C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = i_L; \\ \text{інтервал відсікання} \quad & C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = 0. \end{aligned}$$

Після усереднення змінних такої системи з урахуванням заміни конденсатора джерелом постійної е.р.с. та знаку приросту струму на інтервалах дістанемо алгебраїчні рівняння, які мають вираз для середнього струму навантаження:

$$\begin{cases} L \frac{\Delta I}{T_n} = U_C; \\ L \frac{\Delta I}{T_g} = U_C; \\ I_{нсп} = \Delta I \frac{T_g}{2T} = \frac{U_C}{R_n}. \end{cases} \quad (19)$$

В отриманій системі рівнянь для інвертувального перетворювача струм навантаження на інтервалі відсікання енергії також визначається загальним середнім струмом діода на всьому періоді, що відображено в третьому рівнянні.

Розв'язком отриманої системи з усередненими змінними (19) є такі характеристики інвертувального перетворювача:

$$\Delta I = \frac{T_n U_{ex}}{L}, \quad U_C = \frac{K_3}{\sqrt{2\rho}} \cdot U_{ex}, \quad T_g = T \sqrt{2\rho}. \quad (20)$$

Для визначення умови (14) існування режиму переривчастих струмів в інвертувальному перетворювачі зауважимо, що середній струм дроселя в ньому також описується виразом (11). Отже, для інвертувального перетворювача зона параметрів, що відповідає режиму переривчастих струмів дроселя, визначається після відповідних перетворень таким виразом:

$$\rho < \frac{(1 - K_3)^2}{2}. \quad (21)$$

Отримані аналітичні вирази (15), (18), (21) дають змогу відобразити графічні залежності параметрів  $\rho$  розглянутих перетворювачів, що забезпечують режими переривчастого або безперервного струму дроселя в усьому діапазоні регулювання  $K_3$ . Ці залежності показано на рис. 3. Цифрами 1, 2, 3 на рис. 3 позначено границі режимів для понижувального, підвищувального та інвертувального перетворювачів відповідно. Зона параметрів  $\rho$ , що розташовуються нижче вказаних графіків, відповідає режимам переривчастих струмів дроселя перетворювачів.

Аналіз указаних залежностей свідчить про те, що найбільша за площею зона параметрів  $\rho$  у зоні переривчастих струмів дроселя належить понижувальному перетворювачу (1). Значно менша за площею зона цих параметрів належить інвертувальному перетворювачу (3). Причому максимальне значення  $\rho = 0,5$  відповідає величині  $K_3 = 0$  для

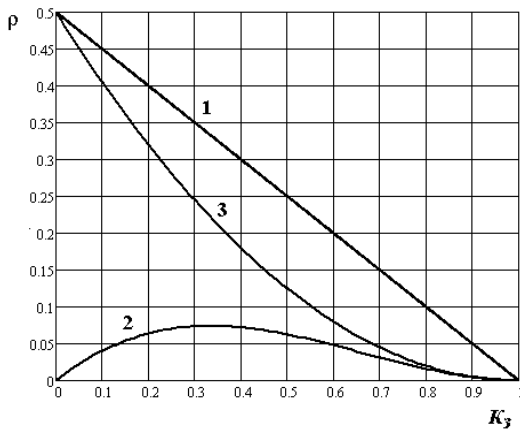


Рис. 3

обох вказаних перетворювачів. Для підвищувального перетворювача площа зони параметрів  $\rho$  у зоні переривчастих струмів є ще набагато меншою (2). Як показує визначення екстремуму функції  $\rho = f(K_3)$ , максимальне граничне значення параметр  $\rho = 0,074$  для такого перетворювача набуває за умови  $K_3 = 1/3$ . Отже, отримані залежності дають змогу обирати допустимі параметри  $\rho = L/R_n T$ , які забезпечують необхідний режим струму дроселя перетворювача в зоні регулювання  $K_3$ . Вірогідність отриманих результатів підтверджено за допомогою імітаційного моделювання процесів у таких перетворювачах у пакеті PSpice.

### Висновки.

1. У результаті виконаних досліджень проілюстровано шлях використання методу усереднення в просторі станів на основі теорем Лагранжа для аналізу процесів у перетворювачах постійної напруги в режимах переривчастого струму індуктивних елементів. Показано, що введення припущення про нехтування пульсаціями та приростами напруги конденсатора на інтервалах у вихідному колі перетворювача знижує порядок системи алгебраїчних рівнянь з усередненими змінними, які описують процеси в перетворювачі як математичну модель. Це дає змогу дістати вказану систему рівнянь у сумісно-визначеному вигляді, значно спростити її розв'язання та визначення основних інтегральних характеристик перетворювача.

2. Для формалізації застосування методу усереднення під час аналізу досліджуваних режимів запропоновано заміну конденсатора в контурі навантаження схеми заміщення перетворювача джерелом постійної е.р.с., що відповідає реалізації припущення про нехтування пульсаціями і приростами напруги на ньому та спрощує у такий спосіб розрахунки.

3. Продемонстровано можливість методу усереднення на основі теорем Лагранжа в отриманні аналітичних залежностей характеристик перетворювачів постійної напруги, що дає змогу застосовувати відомі методи математичного аналізу для ефективного дослідження їх електромагнітних властивостей. Показано також, що можливість отримання інформації про часові параметри усталеного процесу в перетворювачі за розглянутим методом дає змогу розраховувати граничні режими, які визначаються цими параметрами та обумовлюють характер процесу.

4. Проведені дослідження показали, що найбільшу площу зони параметрів, які забезпечують режим переривчастих струмів дроселя серед розглянутих однотактних перетворювачів має понижувальний, найменшу – підвищувальний перетворювач.

*Фінансується за держбюджетною темою "Розвиток теорії та наукове обґрунтування принципів побудови потужних імпульсних напівпровідникових перетворювачів з нелінійним динамічним навантаженням модульної структури" (Джерело-3), державний реєстраційний номер роботи 0119U001289. КПКВК 6541030.*

1. Руденко Ю.В. Способ усреднения модели импульсных преобразователей постоянного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 42–48.
2. Руденко Ю.В. Усреднение модели двухтактного преобразователя постоянного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 37–46.
3. Руденко Ю.В., Руденко Т.В. Усреднение модели импульсного преобразователя с цепью второго порядка. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ*. 2018. Вип. 49. С.88–97.

4. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра. М.: Физматлит, 2004. 280 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука, 1984. 832 с.
6. Cuk S. Power electronics: Modelling, Analysis and Measurements. Vol.2. Create Space Independent Publishing Platform, USA, 2015. 272 p.
7. Maksimovich D., Stankovich A., Thottuvelil V., Verghese G. Modeling and Simulation of Power Electronic Converters. *IEEE Proceedings*, Vol. 89. No. 6. 2001. Pp. 898 – 912.
8. Emadi A. Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging methods. *IEEE Trans. Industrial Electronics*. 2004. Vol.51. Issue 3. Pp. 661 – 668.
9. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Математическая модель электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова*. 2004. № 3. С. 10 –16.
10. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. Москва: Техносфера, 2006. 632 с.

УДК 621.314

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА УСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТЫХ ТОКАХ В ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

**Ю.В. Руденко**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,  
e-mail: [rudenko@ied.org.ua](mailto:rudenko@ied.org.ua)

*Рассмотрены основы метода усреднения в пространстве состояний с использованием теорем Лагранжа для расчета полупроводниковых преобразователей постоянного напряжения, которые работают в режимах прерывистых токов в индуктивных элементах. Для реализации введенного в исследовании допущения предложено замену конденсатора в выходных цепях схемы замещения преобразователя источником постоянной э.д.с. Это позволяет получить упрощенную математическую модель преобразователя для расчета интегральных характеристик, которая соответствует совместно-определенной системе алгебраических уравнений с усредненными переменными. С помощью разработанных моделей рассчитаны параметры понижающего, повышающего и инвертирующего преобразователей, определены аналитические и графические зависимости предельных значений этих параметров, которые обеспечивают заданный режим работы. Полученные зависимости дают возможность сравнения свойств преобразователей и выбора их эффективных параметров. Библ. 10, рис. 3.*

**Ключевые слова:** методы расчета и анализа полупроводниковых преобразователей, метод усреднения в пространстве состояний, преобразователи постоянного напряжения.

## APPLICATION OF THE AVERAGE METHOD FOR ANALYSIS OF DC VOLTAGE CONVERTERS WITH INTERRUPTED CURRENTS IN INDUCTIVE ELEMENTS

**Yu.V. Rudenko**  
Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr.Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [rudenko@ied.org.ua](mailto:rudenko@ied.org.ua)

*The fundamentals of the state-space averaging method using Lagrange's theorems for calculating dc semiconductor converters, which operate in modes of intermittent currents in inductive elements, are considered. To implement the assumption introduced in the study, it is proposed to replace the capacitor in the output circuits of the converter equivalent circuit with a source of constant emf. This makes it possible to obtain a simplified mathematical model of the converter for calculating the integral characteristics, which corresponds to a jointly defined system of algebraic equations with averaged variables. Using the developed models, the parameters of the buck, boost, and inverting converters are calculated, the analytical and graphic dependencies of the limiting values of these parameters are determined, which ensure the specified operating mode. The obtained dependencies make it possible to compare the properties of converters and select their effective parameters. Ref. 10, fig. 3.*

**Keywords:** methods for calculating and analyzing semiconductor converters, an averaging method in the state space, dc converters

1. Rudenko Yu.V. Mode of averaging of pulse DC converter model. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 3. Pp. 42–48. (Rus)
2. Rudenko Yu.V. Averaging of push-pull DC converter model. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 1. Pp. 37–46. (Rus)
3. Rudenko Yu.V., Rudenko T.V. Averaging of model of the pulse converter with a second-degree circuit. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 49. Pp.88–97. (Rus)
4. Illin V.A., Pozniak E.G. Linear algebra. M.: Fizmatlit, 2004. 280 p. (Rus)
5. Korn G., Korn T. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Moskva: Nauka, 1984. 832 p. (Rus)
6. Cuk S. Power electronics: Modelling, Analysis and Measurements. Vol. 2. Create Space Independent Publishing Platform, USA, 2015. 272 p. (Eng)
7. Makcimovich D., Stankovich A., Thottuvelil V., Verghese G. Modeling and Simulation of Power Electronic Converters. *IEEE Proceedings*, Vol. 89. No. 6. 2001. Pp. 898 – 912. (Eng)
8. Emadi A. Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging methods. *IEEE Trans. Industrial Electronics*. 2004. Vol.51. Issue 3. Pp. 661 – 668. (Eng)
9. Kadatsky A.F., Rusu A.P. Mathematical model of electric processes in pulsed DC converters with pulse-width method of regulation. *Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova*. 2004. No 3. Pp. 10–16.(Rus)
10. Meleshin V.I. Transistor conversion technique. Moskva: Tekhnosfera, 2006. 632 p. (Rus)

Надійшла: 06.10.2020

Received: 06.10.2020