

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНОГО ПІДВИЩУВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З АВТОТРАНСФОРМАТОРНИМ УВІМКНЕННЯМ ДРОСЕЛЯ

Ю.В. Руденко, канд. техн. наук, **В.В. Мартинов**, канд. техн. наук

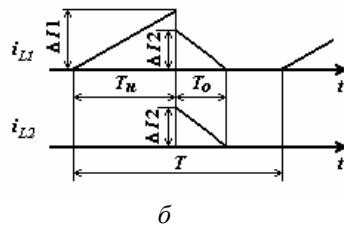
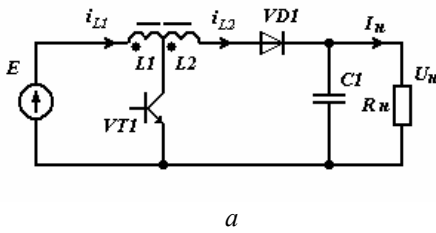
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: rudenko@ied.org.ua; mart_v@ied.org.ua

За допомогою методу усереднення в просторі станів отримано математичну модель імпульсного підвищувального перетворювача постійної напруги з автотрансформаторним увімкненням дроселя з урахуванням неідеальності магнітного зв'язку в ньому. Визначено аналітичні вирази для розрахунку параметрів магнітопов'язаного дроселя перетворювача, які забезпечують необхідні величини вихідної напруги і струму за припустимих навантажень за струмом та напругою на перемикаючому елементі. У результаті аналізу розроблено методику визначення коефіцієнта трансформації та індуктивності обвиток дроселя, вибору діапазону зміни відносної тривалості керуючих імпульсів перемикаючого елемента. Для ілюстрації методики розрахунку визначено параметри досліджуваного перетворювача для високовольтного застосування. Бібл. 6, рисунок, табл. 2.

Ключові слова: метод усереднення в просторі станів, імпульсний підвищувальний перетворювач, автотрансформаторне увімкнення дроселя.

Надійне функціонування вузлів електровакуумного технологічного обладнання вимагає створення ефективних джерел електроживлення. Одним з вузлів такого обладнання, наприклад електронно-променевого, є блок бомбардування катода і модулятора струму променя. Особливістю джерел живлення таких вузлів є формування високої вихідної напруги (2...4 кВ) у разі відносно малої вихідної потужності (100...500 Вт). Такі параметри джерел дають змогу використовувати найпростіші структури однокатних перетворювачів на основі підвищувального імпульсного перетворювача постійної напруги. Причому з метою зменшення напруги на перемикаючому елементі такого перетворювача в порівнянні з вихідною напругою доцільним є використання автотрансформаторного увімкнення дроселя перетворювача [2]. Наразі методи розрахунку однокатних імпульсних перетворювачів досить добре розроблені [1–3]. Але основна увага в них приділяється визначенню інтегральних характеристик перетворювачів (середні та діючі струми та напруги за період комутації) з урахуванням ідеальних моделей, що не дає змоги на стадії проектування розраховувати пульсаційні складові процесів у межах періоду комутації, а тому знаходити граничні (максимальні) режими перемикаючих елементів. Особливо виділяється проблема врахування якості магнітного зв'язку в магнітопов'язаних елементах перетворювачів особливо у високовольтних системах живлення [4]. Тому метою цієї роботи є визначення граничних параметрів перемикаючого елемента у підвищувальному перетворювачі в режимі високої вихідної напруги з автотрансформаторним увімкненням дроселя та неідеальним магнітним зв'язком між його обвитками.

Електрична схема досліджуваного перетворювача представлена на рисунку *a*. Перетворювач містить дросель із автотрансформаторним увімкненням на основі двох магнітопов'язаних напівобвиток з індуктивностями $L1$ і $L2$, силовий транзистор $VT1$, силовий високовольтний діод $VD1$, вихідний конденсатор $C1$. У разі виконання аналізу імпульсного перетворювача приймемо такі припущення: силові перемикаючі елементи (транзистор і діод) є ідеальними ключами, час їхнього перемикання дорівнює нулю; активні опори обвиток дро-



селів і внутрішній опір джерела електроживлення дорівнюють нулю; вихідна напруга U_n і струм I_n навантаження постійні; індуктивності обмоток дроселя лінійні; між обмотками дроселя перетворювача

забезпечується магнітний зв'язок з коефіцієнтом K_{36} , процеси в перетворювачі протікають у режимі переривчастих струмів дроселя. На рисунку б представлено часові діаграми струмів дроселів i_{L1} і i_{L2} . На діаграмах позначено: $\Delta I1$ – приріст струму дроселя $L1$ на інтервалі накопичення енергії тривалістю T_n ; $\Delta I2$ – приріст струму дроселя $L2$ на інтервалі віддачі енергії тривалістю T_o , причому на інтервалі віддачі енергії функції струмів дроселів $L1$ і $L2$ і їхні прирости є рівними між собою.

Для аналізу процесів скористаємося моделлю перетворювача, отриманою за допомогою способу усереднення, розробленого в роботі [5]. Відповідно до нього запишемо диференціальні рівняння, що описують процеси в перетворювачі: на інтервалі накопичення дроселем енергії у разі відкритого стану ключа $L1(di/dt) = E$; на інтервалі віддачі енергії дроселем у разі замкненого стану ключа $(L1 + L2 + 2M)di/dt + u_c = E$, де $M = K_{36}\sqrt{L1L2}$ – величина взаємної індуктивності між обмотками дроселя; i , u_c – миттєві значення струму в дроселі та напруги на конденсаторі.

Використовуючи теорему Лагранжа про середнє значення, а також з огляду на знак похідної струму дроселя на інтервалах роботи перетворювача, запишемо усереднені рівняння:

$$L1 \cdot \Delta I1 / T_n = E; \quad (1)$$

$$(L1 + L2 + 2M) \cdot \Delta I2 / T_o + E = U_c, \quad (2)$$

де U_c – постійна напруга на конденсаторі, що дорівнює напрузі на навантаженні.

Для подальшого аналізу перетворювача визначимо умову існування сталого режиму, при якому вольт-секундні площі для дроселя на розглянутих інтервалах роботи є рівними між собою: $(L1 \cdot \Delta I1 / T_n + M \cdot \Delta I1 / T_n) T_n = (L1 + L2 + 2M) \cdot \Delta I2 / T_o$, звідки отримаємо

$$(L1 + M) \cdot \Delta I1 = (L1 + L2 + 2M) \cdot \Delta I2. \quad (3)$$

Запишемо вираз для струму навантаження, що дорівнює середньому значенню струму дроселя $L2$:

$$T_o \Delta I2 / (2T) = U_c / R_n, \quad (4)$$

де T – період частоти роботи перетворювача.

Вирішуючи отриману усереднену систему (1)–(4) щодо змінних $\Delta I1$, $\Delta I2$, T_o , U_c у разі заданих величин $L1$, $L2$, E , T , T_n , визначимо такі параметри сталого режиму:

$$\Delta I1 = \frac{E\gamma T}{L1}; \quad \Delta I2 = \frac{E\gamma T\alpha}{L1\beta}; \quad T_o = \frac{\tau_{L1}\beta}{\gamma\alpha} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2\gamma^2 T\alpha^2}{\tau_{L1}\beta}}\right); \quad U_c = \frac{E}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2\gamma^2 T\alpha^2}{\tau_{L1}\beta}}\right), \quad (5)$$

де $\gamma = T_n/T$ – відносна тривалість інтервалу накопичення енергії; $K_{TP} = \sqrt{L1/L2}$ – коефіцієнт трансформації; $\tau_{L1} = L1/R_n$ – постійна часу; $\alpha = (K_{TP} + K_{36})/K_{TP}$; $\beta = (K_{TP}^2 + 2K_{36}K_{TP} + 1)/K_{TP}^2$.

Одержавши вирази (5), можна визначити напругу на замкненому ключі перетворювача на інтервалі віддачі дроселем енергії в навантаження. Величина цієї напруги $U_{кз}$ визначається напругою вхідного джерела E та сумою напруг ЕРС самоіндукції дроселя $L1$ і взаємної індукції M на інтервалі T_o :

$$U_{кз} = E + (L1 + M) \Delta I2 / T_o. \quad (6)$$

З залежностей видно, що вихідна напруга U_c і вихідний струм I_n розглянутого перетворювача із зазначеними припущеннями залежать від співвідношення коефіцієнта трансформації обмоток магнітопов'язаного дроселя та коефіцієнта магнітного зв'язку між ними та визначаються параметрами $L1$, R_n у заданому діапазоні регулювання (зміни γ). Напруга на

перемикаючому елементі $U_{кз}$, величину якого необхідно вибрати для використання транзисторів із заданим класом за напругою $U_{зр}$, залежить від коефіцієнта трансформації у разі певного значення постійної часу τ_{L1} та коефіцієнта зв'язку $K_{зб}$.

При проектуванні перетворювача практичний інтерес становить визначення припустимих значень коефіцієнта трансформації $K_{ТР}$ обмоток дроселя, що забезпечує необхідну граничну величину напруги $U_{зр}$ на перемикаючому елементі, а також визначення індуктивності обмотки дроселя $L1$, що забезпечує необхідні напругу на навантаженні U_n і максимальний струм навантаження $I_{нmax}$.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно проаналізувати умови, за яких напруга на перемикаючому елементі $U_{кз}$ менша граничного заданого значення $U_{зр}$: $U_{кз} < U_{зр}$, а також умову існування режиму переривчастих струмів дроселя, у якому досліджується цей перетворювач: $\gamma + T_o/T < 1$. Для виконання першої умови необхідно, щоб виконувалася нерівність

$$E \left(1 + \frac{\alpha}{\rho\beta} \right) < U_{зр}, \text{ де } \rho = \frac{1 + \sqrt{1 + 4K_p(K_p - 1)}}{2K_p(K_p - 1)}, K_p = \frac{U_n}{E}. \text{ Тоді першу умову запишемо у вигляді}$$

$$K_{ТР} < K_{ТРmax} = (K_{зб}(1 - 2F)/2(1 - F)) \cdot \left(\sqrt{1 + (4F(1 - F))/K_{зб}^2(1 - 2F)^2} - 1 \right), \text{ де } F = \rho(U_{зр}/E - 1). \quad (7)$$

Умову існування режиму переривчастих струмів дроселя при знайденому за допомогою (7) коефіцієнті трансформації $K_{ТРmax}$ запишемо у такому вигляді:

$$\gamma_{max} = \frac{K_{ТРmax}}{\rho K_{зб} + K_{ТРmax}(1 + \rho)}, \quad (8)$$

У разі проектування можлива зворотна задача – пошук коефіцієнта трансформації $K_{ТРmin}$ для обраного більш низького значення $\gamma_n < \gamma_{max}$ за збереження заданого значення U_n та режиму переривчастих струмів дроселя. У такому разі, вирішуючи вираз (8) відносно $K_{ТР}$, отримаємо

$$K_{ТРmin} = \gamma_n \rho K_{зб} / (1 - \gamma_n - \gamma_n \rho). \quad (9)$$

Виходячи з виразів (4), (5), також знаходимо рівняння для визначення індуктивності $L1$ дроселя:

$$L1 = \rho \gamma^2 \alpha^2 E T / 2\beta I_{нmax}. \quad (10)$$

Максимальний струм, що протікає в імпульсі через перемикаючий елемент, дорівнює $I_{мке} = 2\beta I_{нmax} / \gamma \rho \alpha^2$.

Аналіз отриманих виразів дає змогу сформулювати особливості методики розрахунку параметрів підвищувального перетворювача з автотрансформаторним увімкненням дроселя в режимі переривчастих струмів у разі заданих значень вхідної та вихідної напруг, вихідного струму, граничного значення напруги на перемикаючому елементі, робочій частоті перетворювача: 1 – розрахунок максимальної величини коефіцієнта трансформації $K_{ТРmax}$ і максимально припустимого коефіцієнта заповнення γ_{max} за виразами (7) і (8) відповідно; 2 – вибір номінального робочого значення коефіцієнта заповнення $\gamma_{ном}$ величиною не більш ніж γ_{max} ; 3 – розрахунок величини індуктивності обмотки $L1$ за виразом (10) за значення $\gamma = \gamma_{ном}$; 4 – розрахунок мінімальної величини коефіцієнта трансформації $K_{ТРmin}$ за формулою (9) у разі значення $\gamma = \gamma_{ном}$; 5 – вибір величини робочого значення коефіцієнта трансформації $K_{ТР}$ у діапазоні $K_{ТРmin} < K_{ТР} < K_{ТРmax}$; 6 – розрахунок максимального імпульсного струму перемикаючого елемента $I_{мке}$. Під час виконання етапу 5 варто враховувати, що чим менша величина $K_{ТР}$, тим менша напруга на перемикаючому елементі $U_{ке}$.

Для ілюстрації методики розрахунку розглянемо приклад перетворювача з такими параметрами: $E = 300$ В, $T = 50$ мкс. Задамо необхідні величини вихідної напруги $U_n = 4$ кВ, вихідного струму навантаження $I_n = 100$ мА, граничне значення $U_{зр} = 600$ В. Для цих параметрів у табл. 1 наведено розраховані граничні значення напруги $U_{ке}$ та струму $I_{мке}$ в перемикаючому елементі, діапазон прийнятних величин коефіцієнта трансформації $K_{ТРmin}$, $K_{ТРmax}$ та індуктивності дроселя $L1$, необхідної для збереження заданих значень вихідного струму I_n та напруги U_n за різних величин магнітного зв'язку $K_{зб}$ в обраних режимах $\gamma_{ном}$ та $K_{ТР}$. У табл. 2

наведено вплив коефіцієнта магнітного зв'язку на значення вихідних напруги U_n та струму I_n у разі збереження величини індуктивності дроселя $L1$, коефіцієнта трансформації K_{TP} та номінального значення $\gamma_{ном}$. У таблиці також наведено відносні відхилення вихідних величин струму та напруги δ_i , δ_u за зміни коефіцієнта магнітного зв'язку між обвитками дроселя.

Таблиця 1

$K_{зв}$	$U_n, В$	$I_n, А$	$L1, мкГн$	K_{TPmax}	K_{TPmin}	γ_{max}	K_{TP}	$\gamma_{ном}$	$U_{ке}, В$	$I_{мке}, А$
1	4000	0,1	547	0,088	0,036	0,5	0,06	0,3	509,4	8,22
0,8			368	0,106	0,029	0,59			473,4	12,2

Таблиця 2

$K_{зв}$	$U_n, В$	$\delta_u, \%$	$I_n, А$	$\delta_i, \%$	$L1, мкГн$	K_{TP}	$\gamma_{ном}$
1	4000	17,32	0,1	17	547	0,06	0,3
0,8	3307		0,083				

Таким чином, ступінь магнітного зв'язку істотно змінює параметри процесів у перетворювачі, через що впливає необхідність його врахування у разі проектування перетворювача. Використання запропонованої методики дасть змогу обирати відносно низьковольтні перемикаючі елементи у разі високих вихідних напруг джерела живлення. Реальний коефіцієнт зв'язку залежатиме від конструкції обвитків дроселя та розраховується за допомогою методик у роботі [6].

У результаті проведених досліджень розроблено методику та визначено аналітичні вирази для розрахунку параметрів високовольтного джерела живлення на основі підвищувального перетворювача з автотрансформаторним увімкненням дроселя з урахуванням неідеальності магнітного зв'язку в ньому, що дає змогу реалізувати необхідні вихідні параметри джерела живлення у разі заданого обмеження на величину струму та напруги на перемикаючому елементі перетворювача. Це реалізується за допомогою вибору індуктивності та коефіцієнта трансформації обвиток магнітопов'язаного дроселя.

1. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. Москва: Издательство «Юрайт», 2012. 667 с.
2. 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.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. Москва: Техносфера, 2006. 632 с.
4. Mohr Malte, Fuchs Friedrich W. Clamping for current-fed dc/dc converters with recovery of clamping energy in fuel cell inverter systems. Proc. 12th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2007. Aalborg, Germany. 2007. Pp.1-10.
5. Руденко Ю.В. Способ усреднения модели импульсных преобразователей постоянного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 42–48.
6. Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. Ленинград: Энергия, 1973. 152 с.

УДК 621.314

Ю.В. Руденко, канд. техн. наук, **В.В. Маргын**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДРОССЕЛЯ

С помощью метода усреднения в пространстве состояний получена математическая модель импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения с автотрансформаторным включением дросселя с учетом неидеальности магнитной связи в нем. Определены аналитические выражения для расчета параметров магнитосвязанного дросселя преобразователя, которые обеспечивают необходимые величины выходного напряжения и тока при допустимых нагрузках по току и напряжению на переключающем элементе. В результате анализа разработана методика определения коэффициента трансформации и индуктивности обмоток дросселя, выбора диапазона изменения относительной длительности управляющих импульсов переключающего элемента. Для иллюстрации методики расчета определены параметры исследуемого преобразователя для высоковольтного применения. Библ. 6, рисунок, табл. 2.

Ключевые слова: метод усреднения в пространстве состояний, импульсный повышающий преобразователь, автотрансформаторное включение дросселя.

Yu.V. Rudenko, V.V. Martynov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

INVESTIGATION OF PROCESSES AND SELECTION OF PARAMETERS FOR PULSE BOOST CONVERTER WITH AUTO-TRANSFORMER INDUCTOR

Using the method of averaging in the state space, a mathematical model of DC pulse boost converter with imperfectly magnetically coupled auto-transformer inductor was obtained. Analytical expressions for calculating the parameters of magnetically coupled inductor of converter are determined, which provide the required values of output voltage and current at the allowable voltage loads on the switching element. As a result of the analysis, a technique has been developed for determining the coefficient of transformation and inductance of the inductor windings, selecting the range of variation in the relative duration of control pulses of switching element. To illustrate the calculation procedure, the parameters of converter for high-voltage application are determined. References 6, figure, tables 2.

Key words: method of averaging in the state space, pulse boost converter, auto-transformer inductor.

1. Zinoviev G.S. Power Electronics: A Training Manual for Bachelors. Moskva: Izdatel'stvo Yurayt, 2012. 667 p. (Rus)
2. 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. № 3. P. 10–16. (Rus)
3. Meleshin V.I. Transistor converter technology. Moskva: Tekhnosfera, 2006. 632 p. (Rus)
4. Mohr Malte, Fuchs Friedrich W. Clamping for current-fed dc/dc converters with recovery of clamping energy in fuel cell inverter systems. Proc. 12th European Conference on *Power Electronics and Applications EPE 2007*. Aalborg, Germany, 2007. P. 1–10. (Eng)
5. Rudenko Yu.V. Mode of averaging of pulse DC converter model. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. № 3. P. 42–48. (Rus)
6. Rusin Ju.S. Transformers of audio- and ultrasonic frequency. Leningrad: Energija, 1973. 152 p. (Rus).

Надійшла 05.03.2018

Received 05.03.2018

УДК 621.314

ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНО-ЄМНІСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

В.М. Спирін, докт.техн. наук, **В.М. Губаревич**, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня**, **С.В. Салко**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна
e-mail: sspirin@ied.org.ua

Розглянуто напрямки покращення електромагнітної сумісності однофазного мостового випрямляча з активно-ємнісним навантаженням, що базуються на використанні ЛМС-фільтра та індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги в джерело струму за схемою ГІ-ЛС. Досліджено електромагнітні процеси в мостовому випрямлячі з активно-ємнісним навантаженням при живленні його від індуктивно-ємнісного перетворювача. Бібл. 9, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: випрямляч, активно-ємнісне навантаження, індуктивно-ємнісний перетворювач, електромагнітна сумісність.

Вступ. Дослідженню електромагнітних процесів в однофазному мостовому випрямлячі з паралельним активно-ємнісним навантаженням, а також покращенню електромагнітної сумісності такого випрямляча з мережею живлення присвячено багато робіт [1, 2, 5, 6, 8]. Одночасно зовсім мало публікацій з дослідження розглянутого в статті випрямляча при живленні його від джерела струму. В роботі [7] розглянуто електромагнітні процеси у випрямлячі з активно-ємнісним навантаженням у разі живлення безпосередньо від джерела синусоїдального струму і визначено коефіцієнт перетворення випрямляча за струмом $k_i = 0,9$. Це значення коефіцієнта k_i визначено для ідеальних випрямлячів та джерела