

ВИСОКОВОЛЬТНІ БАГАТОФАЗНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗІ ЗМЕНШЕНИМ НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ГАЗОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК

В.В. Мартинов*, канд.техн.наук, **А.А. Щерба****, чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: mart_v@ied.org.ua

Розроблено нову концепцію побудови високовольтних багатофазних напівпровідникових перетворювачів зі зменшеним накопиченням енергії для газорозрядних установок на основі синхронних несинфазних симетричних напівпровідникових структур з незначним накопиченням енергії в колах навантаження. Відсутність енергоємних фільтрів у ланках перетворювачів дає змогу формувати напругу з малим рівнем пульсацій, а при імпульсному зменшенні опору навантаження забезпечувати швидке безколивальне зміння струму при низькій його кратності та відсутності безструмової паузи. Застосуванням структурно-аналітичного перетворення та імітаційного моделювання в роботі обґрунтовано, що структурні схеми багатофазних перетворювачів можна привести до еквівалентної однофазної схеми, використання якої істотно спрощує моделювання та розрахунок необхідних динамічних режимів всієї системи з визначенням умов реалізації необхідних зворотних зв'язків і областей стійкості. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: напівпровідниковий перетворювач, напруга, струм, імпульс, несинфазні структури, симетрія, стабілізація, газорозрядна установка, нестационарні режими.

Існує широкий клас потужних споживачів електроенергії, для забезпечення ефективних технологічних режимів яких необхідно формувати високу напругу з малим рівнем пульсацій. До таких споживачів належать електрофізичні, радіотехнічні та високовольтні газорозрядні установки потужністю від одиниць до сотень кіловат, для реалізації технологічних режимів яких необхідно формувати стабільну напругу від одиниць до сотень кіловольт. Зазвичай електротехнічні проблеми такого типу вирішують шляхом застосування високовольтного трансформатора, регульованого напівпровідникового перетворювача зі зворотними зв'язками і випрямляча з індуктивно-ємнісним фільтром на виході.

Проте високовольтні газорозрядні установки є практично безінерційним навантаженням і вимагають швидкодіючого управління режимами (включаючи модуляцію напруги) при незначних зміннях параметрів робочого режиму розряду в газовому проміжку. Ця особливість газорозрядних установок практично виключає можливість застосування в колах їх живлення індуктивно-ємнісних фільтрів та інших елементів, що накопичують електромагнітну енергію [1]. Вирішення зазначеної проблеми ускладнюється при виникненні дуже швидких (по суті, імпульсних) змінень електричного опору цих установок аж до режиму короткого замикання вихідних кіл напівпровідникових перетворювачів [2]. Зауважимо, що застосування індуктивних елементів для обмеження струму в колах електроживлення газорозрядних установок на практиці часто призводить до порушення їхнього технологічного режиму з утворенням безструмової паузи, що істотно впливає на результати технологічного процесу та зменшує ресурс електрообладнання [3,4,5].

Метою роботи була розробка концепції побудови високовольтних напівпровідникових перетворювачів зі зменшеним накопиченням енергії в їхніх вихідних колах на основі використання в них синхронних несинфазних симетричних напівпровідникових структур з незначним накопиченням енергії, що спрощує реалізацію необхідних динамічних режимів у високовольтних газорозрядних установках і визначення областей стійкості та умов формування необхідних зворотних зв'язків.

Проведений всебічний аналіз науково-технічної літератури в зазначеному науковому напрямку показав, що в однофазних перетворювачах постійної напруги з трансформаторною розв'язкою для досягнення заданої якості вихідної напруги принципово необхідно застосовувати реактивні елементи, оскільки при однофазному випрямленні реальної прямокутної напруги коефіцієнт пульсацій від піку до піку дорівнює 100%. Основними факторами, що впливають на пульсації, є тривалість фронтів імпульсної напруги, індуктивність розсіювання трансформатора і динамічні властивості діодів вихідного випрямляча.

У роботі для вирішення цієї проблеми обґрунтовано застосування багатофазних напівпровідникових перетворювачів зі зменшеним накопиченням електроенергії у їхніх вихідних колах [6, 7]. Перетворювачі запропоновано виконувати на основі асиметричних напівпровідникових інверторів з магнітозв'язаним дроселем, які формують систему багатофазних змінних напруг прямокутної форми [6, 8]. Число фаз перетворювача вибиралося не менше трьох, оскільки, починаючи з цієї кількості, досягається певна безперервність струму в навантаженні, принаймні, виключаються 100 % провали у вихідній напрузі. При відносно невисокій частоті комутацій в окремому каналі багатофазні перетворювачі забезпечують оптимальні процеси перетворення електроенергії та суттєво під-

вищують еквівалентну частоту пульсацій у вихідній напрузі, дозволяючи в багатьох випадках розробляти системи електроживлення взагалі без вихідних фільтрів.

Вказані потенційно високі показники якості електроенергії в багатофазних перетворювачах неможливо реалізувати без використання замкненої системи автоматичного керування. У загальному випадку багатофазний напівпровідниковий перетворювач повинен складатися з кількох однакових модулів, що працюють на спільне навантаження [9]. Залежно від поставленого завдання модулі з'єднують паралельно, послідовно або послідовно-паралельно.

На рис. 1 показано схему високовольтного багатофазного напівпровідникового перетворювача, який складається з п'ятих паралельних каналів, що перетворюють первинну постійну напругу в стабілізовану і регульовану, при цьому реалізуючи функцію динамічного обмеження струму [3].

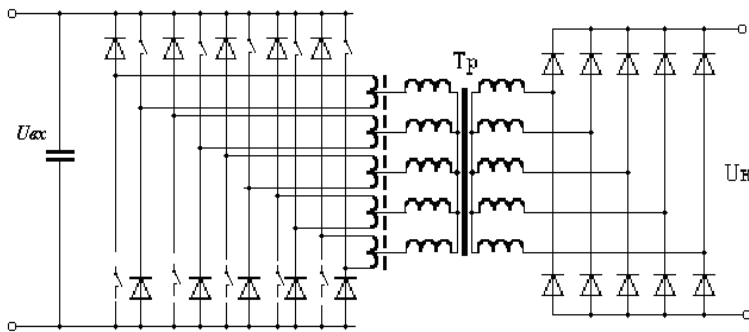


Рис. 1

еквівалентувати багатофазним знижуючим імпульсним регулятором (E, S_n, VD_n, L_n, R) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ (PWM)), причому кожен ШІМ-модулятор функціонує з часовим зсувом $t_z = (k-1) \cdot T/N$, де T – період імпульсної модуляції; N – число фаз перетворювача; k = 1 ... N – порядковий номер комірки багатофазного перетворювача.

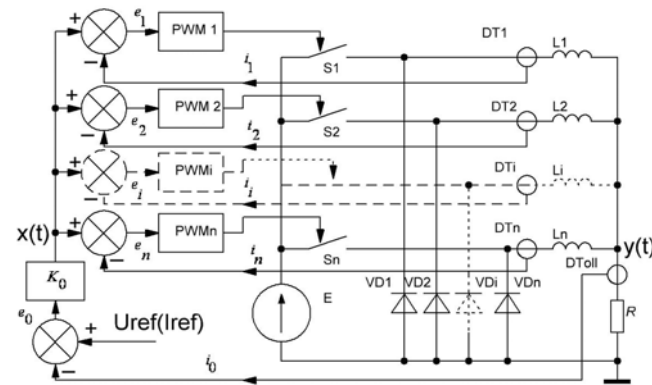


Рис. 2

представлення широтно-імпульсного модулятора ідеальним імпульсним елементом з формувачем [11]. Використовуючи ідеальні імпульсні елементи, схему на рис. 2 було перетворено в еквівалентну, показану на рис. 3, яка містить практично ідентичні паралельні канали перетворення, що відрізняються тільки фазовим зсувом.

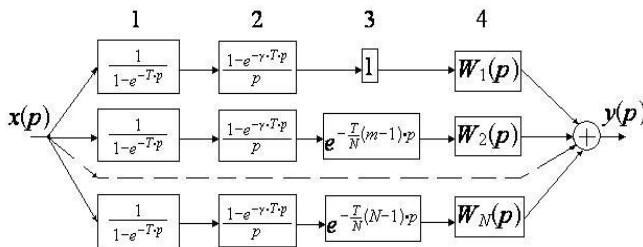


Рис. 3

З огляду на фільтруючі властивості безперервної частини перетворювача та полегшення аналізу динамічних процесів у багатофазній системі, перетворимо структурну схему на рис. 3 в еквівалентну однофазну. Якщо на вході кожної безперервної ланки знаходиться свій імпульсний елемент, то виконуються всі правила перетворення структурних схем безперервних систем [11]. Проведемо структурно-логічні перетворення схеми,

Аналіз електромагнітних процесів у колах п'ятифазного інвертора є досить складним завданням, оскільки пристрій має 30 вентилів, послідовний перебір яких є непродуктивним процесом. Проте, досліджувати динамічні процеси в такому перетворювачі можна після приведення його схеми до більш простої еквівалентної.

Базовим елементом багатофазного перетворювача на рис. 1 є перетворювальні комірки з індуктивностями, показані на рис. 2. На кожному напівперіоді такі комірки багатофазного перетворювача можна

Докладне вивчення властивостей подібних об'єктів систем автоматичного керування (САК) призводить до опису динамічних ланок у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь [8]. Але в багатьох випадках їх можна лінеаризувати [10], тобто замінити нелінійні рівняння лінійними, що наближено описують процеси в системах. Такий підхід є можливим, оскільки в більшості випадків нормально функціонуюча система працює в режимі малих відхилень, при яких нелінійності можна не враховувати. При необхідності в подальших дослідженнях можна врахувати деякі особливості, що вносяться нелінійностями об'єкта.

При аналізі дискретних систем з широтно-імпульсним модулятором часто використовують пред-

На рис. 3 показано еквівалентну схему, що відповідає розімкненому контуру керування перетворювача з приведенням передавальних функцій: $1/[1 - \exp(-T \cdot p)]$ – ідеального імпульсного елемента з періодом комутації T; $[1 - \exp(-\gamma \cdot T \cdot p)]/p$ – фіксує ланки нульового порядку; $\exp(-T/N(m-1)p)$ – ідеального елемента затримки на час зсуву моментів спрацьовування імпульсного елемента у відповідній фазі регулятора; $W(p) = 1/(Lp)$ – передавальної функції безперервної частини однієї фази регулятора струму; N – числа фаз перетворювача.

наведеної на рис. 3. Перенесемо елементи четвертої групи за суматор, у такому випадку на виході отримаємо еквівалентну ланку з передавальною функцією

$$Wall(p) = W_1(p) + \dots + W_N(p) = 1 / ((L \cdot p) / N). \quad (1)$$

Елементи першої, другої та третьої групи (рис. 3) представляють собою N імпульсних елементів, які працюють з фіксованими зсувом T/N один відносно одного на загальну безперервну частину (1). У такому випадку вихідна послідовність ШІМ-імпульсів ($U_{out-all}$ на рис. 4) дорівнює сумі вихідних ШІМ-імпульсів кожного з імпульсних елементів (U_{out1} на рис. 4). Отже, усі імпульсні модулятори можна замінити одним імпульсним елементом з періодом модуляції, рівним T/N [12].

Елементи третьої групи, тобто елементи затримки структурної схеми на рис. 2, перенесемо на вхід системи, підсумуємо і отримаємо

$$1 + e^{-Tp/N} + \dots + e^{-T(N-1)p/N} = 1 + \sum_{m=1}^N e^{-T(m-1)p/N}. \quad (2)$$

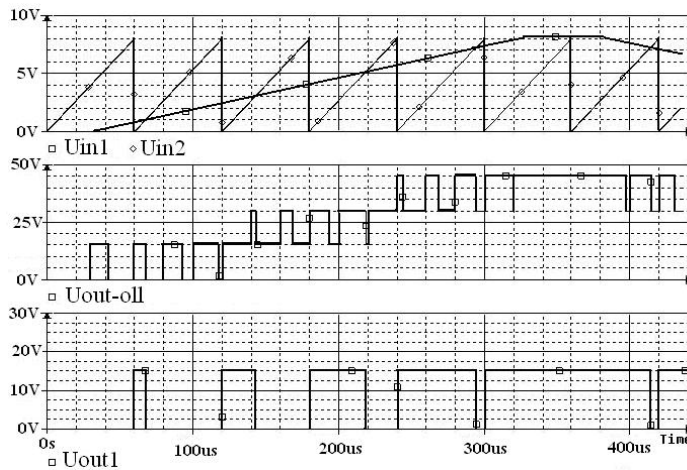


Рис. 4

римаємо модель багатофазного регулятора струму, що містить один еквівалентний канал перетворення електроенергії, відображений на рис. 5.

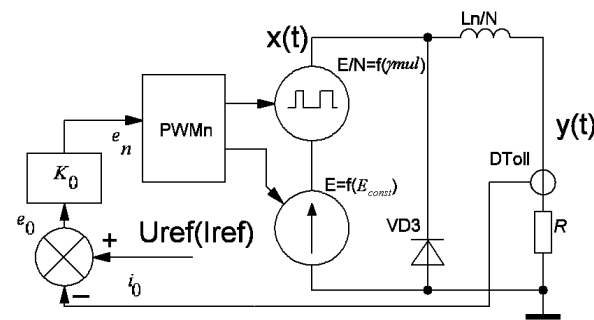


Рис. 5

жиму стеження за стиком, з використанням вторинних емісійних систем у режимі реального часу, а це вимагає, щоб система мала короткий перехідний процес без перерегулювання.

Час перехідного процесу в демпфівальній системі другого порядку (без урахування імпульсного характеру процесів) можна визначити як $t_{np} = ((2 \div 10) 2\pi / \omega_{cp})$. У середньому можна вважати, що для забезпечення заданої тривалості перехідного процесу (рівної, наприклад, 100 мкс) необхідно мати систему з пропускну здатністю не менш $\omega_{cp} = 50$ кГц. Тоді в однофазному інверторі частота перемикачів транзисторів має бути не меншою від 500 кГц.

Дослідження показали, що для реалізації перехідного процесу тривалістю в 100 мкс при 100%-му скиді – накиді навантаження в потужному високовольтному ідеальному перетворювачі, побудованому на основі багатофазної схеми з використанням несиметричних інверторів (в яких частота перемикачів дорівнює 20 кГц), необхідно реалізувати синхронну несинфазну систему з числом фаз, що дорівнює 12.

На рис. 6 показано результати експериментальних досліджень багатофазного джерела електроживлення електронно-променевої зварювальної установки, що працює в імпульсному режимі з тривалістю перехідних процесів, меншою 1 мс.

З (2) випливає, що суму ідеальних елементів затримки з урахуванням сигма-функції, діючої в кожному каналі, можна представити єдиною ланкою – ступінчастою функцією. Кількість ступенів дорівнює числу фаз перетворювача, а ШІМ модуляція з періодом T/N здійснюється тільки на останньому рівні. Іншими словами, елемент – ступінчасту функцію, можна ідентифікувати комбінованим джерелом живлення, що містить два джерела. Одне джерело має змінну амплітуду і змінюється дискретно з кроком E/N , причому кількість дискрет дорівнює $(N-1)$: $E_{const} = E \cdot G / N$, $G = (\gamma \cdot T) / T_{mul}$, а інше джерело має постійну амплітуду E/N , яка модулюється ШІМ-сигналом з періодом T/N , де $\gamma_{mul} = \gamma \cdot T - T_{mul} \cdot G / T_{mul}$ (приведено відносно тривалість імпульсів одноканальної еквівалентної схеми). В результаті от-

З отриманих виразів видно, що зі збільшенням числа фаз постійна часу наведеної безперервної частини зменшується. Разом з цим збурюючий вплив ШІМ модуляції теж зменшується і, як наслідок, максимальне значення змінної складової, зокрема струму, зменшується. Отже, застосування багатофазного управління є ефективним засобом поліпшення показників якості електроенергії.

Згідно зі стандартами (зокрема ISO14744-1: 2000) для електронно-променевого зварювання нормуються тільки нестабільність і пульсації прискорюючої напруги. Але ряд сучасних технологій накладає обмеження на якість перехідного процесу, наприклад, для реалізації ре-

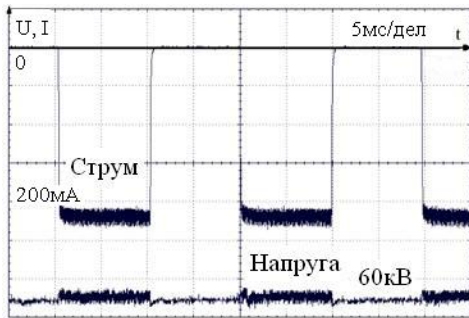


Рис. 6

У напівпровідниковому перетворювачі для електронно-променевої зварювальної установки, яка створена на основі структурної схеми на рис. 1, реалізовано функції:

- стабілізації високої напруги, яка може здійснюватися за багатоконтурною схемою із зворотними зв'язками за струмом модулів інвертора, за струмом навантаження, за вихідною напругою і т.п.;
- динамічного обмеження вихідного струму високої напруги на рівні, який був до моменту виникнення пробою або короткого замикання, що унеможливує коливальні перехідні процеси у разі припинення перевантаження у вихідних ланцюгах;
- автоматичного повторного пуску – переривання вихідного струму інвертора на час, достатній для руйнування дугового розряду

при виникненні недопустимо тривалих пробивів або КЗ у навантаженні.

Проведені дослідження показали, що напівпровідникові перетворювачі на основі асиметричного інвертора з дроселем на основі двох магнітозв'язаних напівобмоток з відносно великою постійною часу силової частини, низькою швидкодією і невисокою якістю вихідної напруги, об'єднані в синхронну несинфазну систему, дають змогу створити потужні високовольтні напівпровідникові перетворювачі з поліпшеною швидкодією, зменшеним запасом енергії у вихідних ланцюгах і зменшеними пульсаціями у вихідній напрузі.

Висновки.

1. Розроблено концепцію побудови високовольтних напівпровідникових перетворювачів зі зменшеним накопиченням енергії у вихідних колах на основі використання синхронних несинфазних симетричних напівпровідникових структур з незначним накопиченням енергії, що спрощує реалізацію необхідних динамічних режимів високовольтних джерел живлення для газорозрядних установок і визначення областей стійкості та умов формування необхідних зворотних зв'язків.

2. Шляхом структурно-логічних перетворень ідеальних імпульсних елементів, формувачів та елементів затримки на прикладі багатофазного напівпровідникового перетворювача з асиметричними інверторами отримано еквівалентну однофазну модель комбінованого джерела живлення ступеневого типу. Кількість ступенів комбінованого джерела на одиницю менше, ніж число фаз перетворювача. Залежно від режиму роботи на вході безперервної частини однофазної моделі діє джерело живлення, що містить постійну і модульовану складову.

2. Отримано аналітичні залежності, що описують комбіноване джерело живлення. На прикладі реальних параметрів багатофазного перетворювача і його еквівалентної моделі розраховано виникаючі в його ланцюгах перехідні процеси. Аналіз отриманих експериментальних результатів показує, що, маючи ідентичні процеси у вихідних ланцюгах, однофазна модель істотно спрощує аналіз і реалізацію системи зворотних зв'язків.

3. Показано, що без додаткових заходів по корекції частотних характеристик, стійкість багатофазної системи визначається стійкістю окремих фаз, що входять до неї. Отримані результати дозволяють визначати необхідні співвідношення коефіцієнтів підсилення і параметрів силової частини багатофазних регуляторів струму для забезпечення стійкості регулювання.

1. Казимиров Н.Н., Лоскутов Г.А. Переходные процессы в источнике питания при погасании разряда в сварочной пушке. *Автоматическая сварка*. 1983. № 11 (368). С. 41-43.
2. Кручинин А.М., Долбилин Е.В., Чурсин А.Ю. Источники питания установок с концентрированными потоками электроэнергии. *Электротехника*. 1987. № 8. С. 36-39.
3. Мартынов В.В., Монжеран Ю.П., Можаровский А.Г., Лебедев Б.Б., Смитюх Г.Е., Чайка Н.В., Иванов А.М. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого нагрева. *Современная электротехнология*. 2010. № 2. С. 57-60.
4. Ткачев Л.Г., Батов Н.Г. Волновые процессы в технологических установках с электронно-лучевым нагревом. *Электротехника*. 1995. № 9. С.39-41.
5. Назаренко О.К., Гурин О.А., Болгов Э.И. Особенности токовой защиты источников питания для электронно-лучевой сварки. *Автоматическая сварка*. 2013. № 1. С. 3-6.
6. Мартынов В.В., Источники электропитания для электронно-лучевого и плазменного технологического оборудования. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2004. Вип. 3(9). С. 43-49.
7. Мартинов В.В., Руденко Ю.В., Монжеран Ю.П. Дослідження взаємодії силових транзисторних перетворювачів з дуговими, плазовими та променевими технологічними навантаженнями. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2010. Вип. 25. С. 145-159.
8. Мартынов В.В., Руденко Ю.В. Нагрузочные характеристики асимметричного инвертора с магнитосвязанным дроселем. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 234-237.
9. Юрченко А.И., Головацкий В.А. Многофазные импульсные стабилизаторы постоянного напряжения. *Электронная техника в автоматике*. 1978. Вип. 10. С. 107-113.
10. R. Redl and N. O. Sokal. Current-mode control, five different types, used with the three basic classes of power converters: small-signal AC and large-signal DC characterization, stability requirements, and implementation of practical circuits. in *Proc. IEEE PESC'85*. Pp. 771-785.
11. Джюри Э. Импульсные системы автоматического регулирования. Москва: Физматгиз, 1963. 456 с.
12. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. Москва: Физматгиз, 1963. 968 с.

УДК 621.314

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ МНОГОФАЗНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С УМЕНЬШЕННЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК

В.В. Мартынов, канд.техн.наук, **А.А. Щерба**, чл.-корр. НАН Украины

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: mart_v@ied.org.ua

Разработана новая концепция построения высоковольтных многофазных полупроводниковых преобразователей с уменьшенным накоплением энергии для газоразрядных установок. Концепция разработана на основе создания параллельно соединяемых синхронных симметричных несинфазных полупроводниковых структур с уменьшенным накоплением энергии в выходных цепях. Такой подход позволяет создавать преобразователи, которые без применения энергоемких фильтров реализуют как выходное напряжение с малым уровнем пульсаций, так и безколебательное импульсное изменение тока при низкой его кратности и безтоковой паузе во время импульсного уменьшения сопротивления нагрузки. С применением структурно-аналитического преобразования и имитационного моделирования было обосновано, что многообразие структурных схем таких многофазных преобразователей можно привести к эквивалентной однофазной схеме, что существенно упрощает их моделирование, анализ и проектирование необходимых устройств обратных связей, а также определение областей устойчивости и требуемой динамики всей системы. Библ. 12, рис. 6.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, напряжение, ток, импульс, несинфазные полупроводниковые структуры, симметрия, стабилизация, газоразрядная установка, нестационарные режимы.

HIGH-VOLTAGE MULTIPHASE SEMICONDUCTOR CONVERTERS WITH REDUCED ENERGY ACCUMULATION FOR GAS-DISCHARGE INSTALLATIONS

V.V. Martynov, A.A. Shcherba

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: mart_v@ied.org.ua

A new concept has been developed for constructing of the high-voltage multiphase semiconductor converters with reduced energy storage for gas-discharge installations. The concept is developed on the basis of the creation of parallel-connected synchronous symmetric non-phase semiconductor structures with a reduced accumulation of energy in the output circuits. This approach allows the creation of converters which realize without the use of energy-intensive filters both low level of output voltage ripples and non-oscillatory pulse current change at low multiplicity and a non-current pause during the impulse decrease of the load resistance. Using the structural-analytical transformation and simulation modeling, it was justified that the variety of structural schemes of such multiphase converters can be reduced to an equivalent single-phase scheme that greatly simplifies their modeling, analysis and design of necessary feedback devices, as well as the determination of stability regions and the required dynamics of the entire system. References 12, figures 6.

Key words: semiconductor converter, voltage, current, pulse, non-phase semiconductor structures, symmetry, stabilization, gas discharge installation, nonstationary regimes.

1. Kazimirov N.N., Loskutov G.A. Transient processes in the power source when the discharge in the welding gun goes out. *Avtomaticheskaia svarka*. 1983. No 11 (368). Pp. 41-43. (Rus)
2. Kruchinin A.M., Dolbilin E.V., Chursin A.Yu. Power sources of installations with concentrated streams of *electricity*. *Elektrotehnika*. 1987. No 8. Pp. 36-39. (Rus)
3. Martynov V.V., Montgeran Yu.P., Mozharovsky A.G., Lebedev B.B., Smiitiukh G.E., Chaika N.V., Ivanov A.M. High-voltage power supply for electron-beam heating. *Sovremennaia elektrometalurgii*. 2010. No 2. Pp. 57-60. (Rus)
4. Tkachev L.G., Batov N.G. Wave processes in technological installations with electron beam heating. *Elektrotehnika*. 1995. No 9. Pp. 39-41. (Rus)
5. Nazarenko O.K., Gurin O.A., Bolgov E.I. Features of current protection of power supplies for electron-beam welding. *Avtomaticheskaia svarka*. 2013. No 1. Pp. 3-6. (Rus)
6. Martynov V.V. Sources of power supply for electron beam and plasma technological equipment. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiku Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2004. No 3(9). Pp. 43-49. (Rus)
7. Martynov V.V., Rudenko Yu.V., Montgeran Yu.P. Investigation of the interaction of power transistor converters with arc, plasma and beam technological loads. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiku Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. No 25. Pp. 145-159. (Ukr)
8. Martynov V.V., Rudenko Yu.V. Load characteristics of an asymmetric inverter with magnetically bound choke. *Vestnik Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta Kharkovskiyi Politekhnicheskii Institut*. 2017. Issue 27(1249). Pp. 234-237. (Rus)
9. Yurchenko A.I., Golovatsky V.A. Multi-phase impulse regulators of constant voltage. *Elektronnaia tekhnika v avtomatike*. 1978. Issue. 10. Pp. 107-113. (Rus)
10. R. Redl and N.O. Sokal, Current-mode control, five different types, used with the three basic classes of power converters: small-signal AC and large-signal DC characterization, stability requirements, and implementation of practical circuits. In *Proc. IEEE PESC'85*. Pp. 771-785
11. Dzhuri E. Pulse systems of automatic regulation. Moskva: Fizmatgiz, 1963. 456 p. (Rus)
12. Tsyppin Ya.Z. Theory of linear impulse systems. Moskva: Fizmatgiz, 1963. 968 p. (Rus)

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 26.03.2018