

УДК 621.314: 621.311.6

Ю. В. БОНДАРЕНКО, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО,
к. т. н. П. С. САФРОНОВ, д. т. н. В. Н. СИДОРЦЬ¹

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический университет,

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОЯЧЕЙКОВОГО ТРАНЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для оптимизации структуры многоячейкового транзисторного преобразователя с комбинированным управлением предложено использовать аддитивный критерий, учитывающий такие частные критерии, как энергоэффективность, стоимость и объем конструкции преобразователя.

Ключевые слова: транзисторный преобразователь, многоячейковая структура, комбинированное управление, оптимизация структуры, аддитивный критерий.

Для регулирования тока в различных электротехнических установках широко используются транзисторные преобразователи (ТП). Перспективным направлением в развитии преобразовательной техники является построение ТП по модульному принципу, согласно которому ток (напряжение) формируется параллельно (последовательно) соединенными унифицированными транзисторными модулями (ячейками). На сегодняшний день модульный принцип успешно применяется при построении ТП различных типов, в том числе многоуровневых инверторов [1–4], выпрямителей [5], импульсных преобразователей постоянного напряжения [3, 4, 6] и др.

Каждая унифицированная ячейка ТП с модульной структурой может содержать один или несколько силовых транзисторов, защитные и токовыравнивающие элементы, а также элементы управления. Любые, сколь угодно большие, токи и напряжения в многоячейковых преобразователях могут быть получены путем объединения идентичных ячеек сравнительно небольшой мощности. При этом достигается улучшение формы напряжения и тока, повышается гибкость перестройки структуры преобразователя, обеспечивается высокая степень унификации конструкции, повышается надежность работы за счет резервирования ячеек [3, 4].

Следует отметить, что при проектировании преобразователей со сложной структурой разработчики часто сталкиваются с проблемами оптимизации их конструкции. В частности, при проектировании многоячейковых преобразователей необходимо решить, какое количество унифицированных ячеек способно обеспечить требуемые выходные параметры и характеристики. Как правило, для того чтобы выбрать количество ячеек, оптимальное с точки зрения максимального

учета всех требований, предъявляемых к преобразователю, необходимо провести серьезный предварительный анализ исходных данных, выполнить довольно сложные расчеты.

В данной работе исследуется изменение основных характеристик многоячейкового преобразователя при изменении количества и мощности ячеек. Анализ проводится на примере многоячейкового ТП с комбинированным (непрерывно-импульсным) управлением, предложенным в [7] для регулирования тока в установках контактной микросварки с целью получения качественных сварных соединений. Благодаря унифицированной модульной структуре и использованию режима комбинированного управления транзисторами ячеек преобразователь способен обеспечить высокую точность регулирования тока и эффективное энергопотребление.

Выбор критериев оптимизации структуры преобразователя

Преобразователь представляет собой модульную структуру, состоящую из N идентичных транзисторных ячеек (**рис. 1**). Каждая ячейка включает в себя элементарный преобразователь с непрерывным управлением (НеП) и элементарный преобразователь с импульсным управлением (ИмП), соединенные параллельно.

Ток i_n в нагрузке преобразователя формируется как сумма N токов, каждый из которых регулируется отдельной транзисторной ячейкой в пределах от нуля до заданного максимального значения $I_{\max}$ (**рис. 2**). Нарастание тока в нагрузке по заданному закону [8] обеспечивается постепенным введением ячеек в работу. При этом до момента достижения значения $I_{\max}$ током каждой подключаемой ячейки его регулирование осуществляется с высокой точностью в непрерывном режиме, а после достижения $I_{\max}$ это значе-

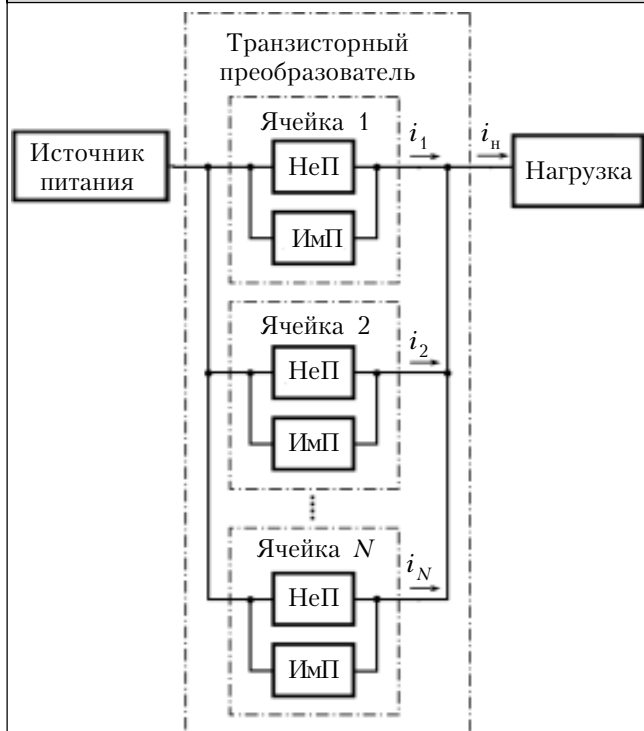


Рис. 1. Упрощенная структура многоячейкового ТП с комбинированным управлением

ние тока продолжает поддерживаться в импульсном режиме до окончания сварки.

Таким образом, в каждый момент времени t ток в нагрузке регулируется определенным количеством ячеек, работающих в импульсном режиме, и одной ячейкой, работающей в непрерывном режиме. При этом последняя компенсирует пульсации, вносимые остальными ячейками, что обеспечивает высокую точность поддержания заданного закона изменения тока [9].

Поскольку в каждый момент времени непрерывно регулируется только часть общего тока нагрузки (от 0 до $I_{\max}$), мощность потерь на транзисторах существенно ниже, чем при регулировании всего тока нагрузки в непрерывном режиме [10].

Характеристики такого преобразователя в значительной степени определяются количеством унифицированных модулей (ячеек), входящих в его состав, а также их мощностью, причем одни и те же значения его выходных параметров могут быть получены при объединении разного количества ячеек, рассчитанных на большую или меньшую мощность. При этом такие характеристики, как энергоэффективность, стоимость, масса и габариты преобразователя могут существенно изменяться. Например, ток 500 А в нагрузке можно получить путем суммирования токов пяти ячеек, каждая из которых рассчитана на 100 А, или десяти ячеек — на 50 А, но естественно, что структуры преобразователя из пяти более мощных и десяти менее мощных ячеек не являются тождественными. Для рас-

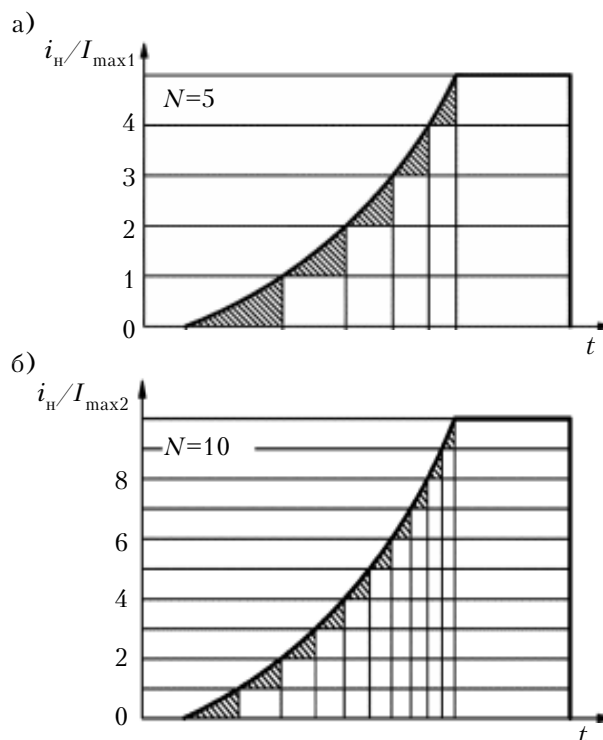


Рис. 2. Кривая тока, сформированная пятью (а) и десятью (б) унифицированными ячейками

считываемого многоячейкового преобразователя увеличение количества ячеек с одновременным снижением их мощности обеспечит повышение энергоэффективности, но с другой стороны может привести к ухудшению массогабаритных и стоимостных показателей.

Таким образом, необходимость нахождения оптимального количества ячеек преобразователя соответствующей мощности очевидна, и для оптимизации структуры должны быть выделены основные критерии.

Для исследуемого многоячейкового ТП с комбинированным управлением в качестве основных критериев выделим его энергоэффективность, стоимость и объем конструкции. Проведем анализ их зависимости от количества (мощности) ячеек в преобразователе для типовых значений выходных параметров, используемых при микросварке.

Энергоэффективность преобразователя

Различие в мощности потерь в ТП при формировании одинаковой кривой тока различным количеством ячеек N (5 и 10), рассчитанных, соответственно, на больший ($I_{\max1}$) и меньший ($I_{\max2}=0,5I_{\max1}$) максимальный ток, можно увидеть на рис. 2. Заштрихованные области здесь соответствуют интервалам использования режима непрерывного управления транзисторами, а их площадь пропорциональна мощности потерь. Как видно, суммарная площадь заштрихованных областей на рис. 2, б заметно меньше, чем на рис. 2, а. Это значит, что энергоэффектив-

ность преобразователя с большим количеством ячеек, рассчитанных на меньший ток, выше.

Среднюю рассеиваемую на транзисторах преобразователя мощность $P_{\text{ср}}$, состоящую из потерь на интервалах работы в непрерывном и импульсном режимах, можно рассчитать по формуле [10]

$$P_{\text{ср}} = \sum_{k=1}^N \left[\int_{t_k}^{t_{k+1}} (i_n(t) - I_{\text{max}}(k-1)) \times (U_{\text{н}} - u_n(t)) dt + (k-1) P_{\text{ср}k}^{\text{имп}} \times (t_{k+1} - t_k) \right] / (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}k}^{\text{имп}}$ — средняя мощность потерь на элементах k -й ячейки в импульсном режиме;

$U_{\text{н}}$ — напряжение питания преобразователя;

$u_n(t)$ — мгновенное значение напряжения нагрузки преобразователя;

I_{max} — максимальный ток ячейки;

$t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$ — моменты начала и окончания этапа нарастания тока по степенному закону.

Представленные далее результаты расчетов были получены для условий формирования заданной кривой тока различным количеством ячеек (от 2 до 20) при следующих значениях основных параметров:

- предельный уровень тока в нагрузке 500 А;
- длительность интервала нарастания тока в нагрузке 1 мс;
- закон изменения тока на интервале нарастания $i_n(t) = at^2$, где a — коэффициент, зависящий от параметров сварочного импульса;
- частота переключения транзисторов при импульсном управлении 50 кГц.

Как видно из **рис. 3**, формирование кривой тока большим количеством ячеек меньшей мощности однозначно позволяет повысить энергоэффективность преобразователя. Однако существенная нелинейность приведенной зависимости свидетельствует о том, что увеличение N на

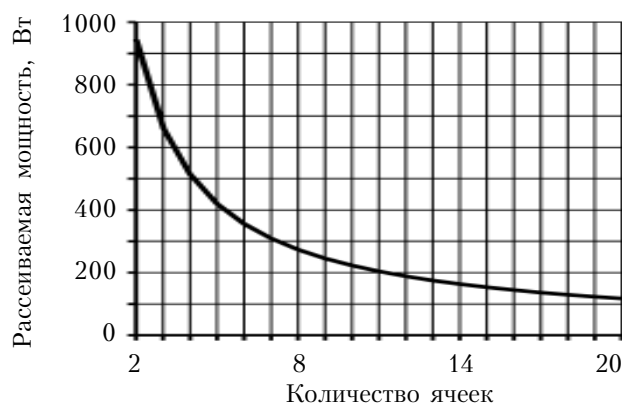


Рис. 3. Зависимость рассеиваемой мощности от количества ячеек в преобразователе

разных участках исследуемого интервала дает разный эффект. Так, при увеличении количества ячеек, например, с трех до четырех мощность потерь снижается на 150 Вт, а при увеличении N с тринадцати до четырнадцати — всего на 15 Вт. Это необходимо учитывать при разработке структуры преобразователя, чтобы избежать неоправданного, с точки зрения повышения энергоэффективности, увеличения количества ячеек.

Стоимость преобразователя

Оценку изменения стоимости ТП в зависимости от количества ячеек в нем сведем к оценке изменения стоимости основных элементов, входящих в состав силового блока преобразователя, поскольку она составляет основную часть стоимости всего устройства. Для расчета воспользуемся формулой

$$C_{\Sigma} = N \sum_{n=1}^p q_n C_n, \quad (2)$$

где C_{Σ} — суммарная стоимость элементов;

p — количество наименований элементов;

q_n, C_n — количество и стоимость элементов n -го наименования соответственно.

Основными элементами силового блока преобразователя являются транзисторы, обратные диоды, измерительные шунты и дроссели фильтра. Их тип определяется значением максимального тока ячейки, которое вычисляется по формуле $I_{\text{max}} = I_{\text{пр}} / N$ ($I_{\text{пр}}$ — заданный предельный уровень тока в нагрузке).

Для подбора типа дросселя необходимо рассчитать индуктивность L , исходя из необходимости обеспечения среднего значения сглаженного тока, равного максимальному току ячейки [11]. Амплитуда пульсации ΔI_L в расчетах была принята равной 10% от среднего значения сглаженного тока, а расчет проводился по формуле

$$L = 0,5 U_{\text{н}} \gamma (1 - \gamma) T / (\Delta I_L), \quad (3)$$

где γ — коэффициент заполнения импульсов;

T — период импульсов управления транзистором.

При вычислении стоимости элементов ТП необходимо также иметь в виду, что значительные токи, протекающие в силовых цепях преобразователя, вызывают нежелательный нагрев транзисторов. Это избыточное тепло должно быть отведено от транзисторов для обеспечения их надежного функционирования. Поэтому в преобразователях с небольшим количеством ячеек, рассчитанных на большие токи, на силовых транзисторах должны быть установлены охлаждающие радиаторы, стоимость которых также нужно учитывать при вычислении общей стоимости элементов.

Выбрать радиаторы охлаждения для транзисторов ячеек можно из каталогов фирм-произво-

Типы и стоимость элементов силового блока преобразователя, обеспечивающего предельный ток 500 А [12–16]

N	$I_{\max}$, А	Транзистор		Диод		Шунт		Дроссель	
		Тип	Цена, грн.	Тип	Цена, грн.	Тип	Цена, грн.	Индуктивность, мкГн	Цена, грн.
2	250	IRLS3036	48,48	300CNQ045	430,16	ЕК-75ШИП-300А	184,21	0,26	0,98
5	100	IRFP3306	15,72	120NQ045	176,00	ЕК-75ШИП-150А	141,37	0,64	0,49
10	50	IRLU8721	2,48	MBR6045	22,40	ЕК-75ШИП-60А	84,25	1,28	0,29
20	25	IRLU7807	2,24	STPS30L45	5,68	ЕК-75ШИП-30А	82,82	2,55	0,17

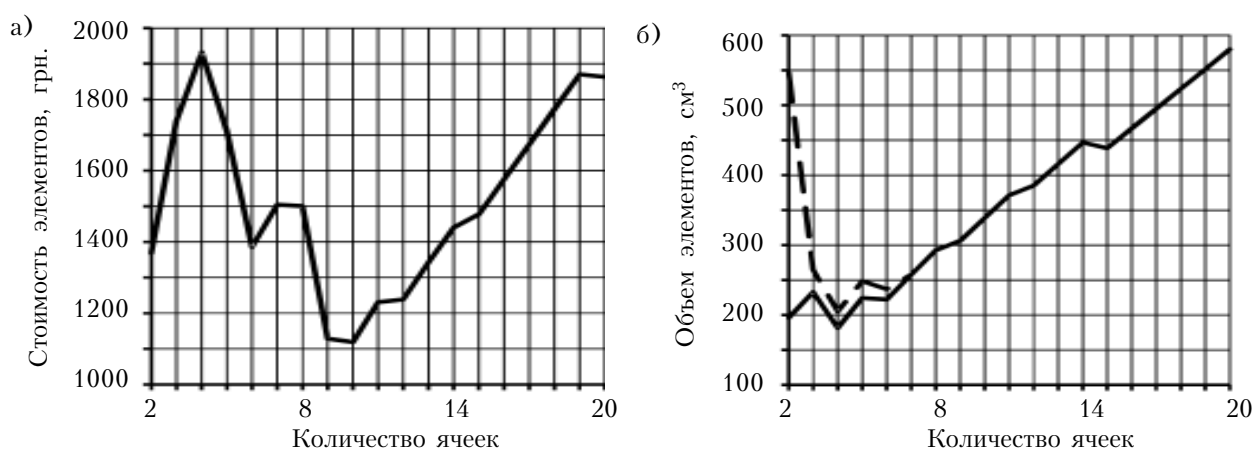


Рис. 4. Зависимость стоимости (а) и объема (б) элементов силового блока от количества ячеек в преобразователе при $I_{\max}=500$ А

дителей по значениям теплового сопротивления R_{θ} , которое рассчитывается согласно формуле

$$R_{\theta} = (T_{\text{пр}} - T_{\text{норм}}) / P_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{пр}}$, $T_{\text{норм}}$ — соответственно, предельная и нормальная (25°) температура транзистора.

Проведенные расчеты показали, что при количестве ячеек больше шести протекающий ток не вызывает опасного перегрева силовых транзисторов и поэтому необходимости в установке радиаторов нет.

В таблице для примера приведены типы и стоимость основных элементов силового блока, выбранных в соответствии с рассчитанными значениями максимального тока ячейки при некоторых N . Стоимость радиаторов охлаждения включена в стоимость транзисторов для количества ячеек $N < 7$.

Представленный на рис. 4, а график изменения стоимости элементов силового блока в зависимости от количества ячеек в преобразователе имеет выраженный минимум. Минимальная суммарная стоимость элементов преобразователя получена при количестве ячеек, равном десяти,

а наибольшая — четырём. Высокая суммарная стоимость при небольшом количестве ячеек обусловлена значительно большей ценой элементов, рассчитанных на большие значения тока. Разница в цене особенно велика для диодов. Например, цена диода, рассчитанного на 180 А в четырнадцать раз больше, чем рассчитанного на 60 А. Поэтому из-за существенной разницы в цене на элементы с высоким и низким предельным значением тока суммарная стоимость элементов в начале и в конце рассматриваемого диапазона N примерно одинакова.

Объем конструкции преобразователя

Аналогично оценке стоимости, изменение объема конструкции ТП в зависимости от количества ячеек в нем рассмотрим только для силового блока преобразователя.

Для расчета воспользуемся формулой

$$V_{\Sigma} = N \sum_{n=1}^p q_n V_n, \quad (5)$$

где V_{Σ} — суммарный объем элементов в преобразователе;

V_n — объем элементов определенного наименования.

Линейные размеры элементов для расчета их объема выбирались из [12, 14, 16, 17]. Линейные размеры дросселей рассчитывались исходя из их диаметра и количества витков, а также диаметра провода, из которого они изготавливаются.

Результаты расчетов представлены на рис. 4, б, где сплошная линия соответствует изменению объема конструкции ТП без радиаторов, штриховая — с учетом радиаторов ($N < 7$).

Как видно из графиков, максимальный суммарный объем (при $N=20$) превышает минимальный (при $N=4$) в 3,2 раза. За исключением начального интервала, график изменения объема основных элементов преобразователя является возрастающим, однако содержит участки, на которых увеличение количества ячеек в преобразователе не приводит к существенному увеличению объема его конструкции либо, напротив, приводит к его уменьшению. Это обусловлено переходом к более компактным типам корпусов элементов, которые рассчитаны на меньший предельный ток.

Разумеется, простое арифметическое сложение объемов элементов преобразователя не дает точной информации об объеме конечного устройства, который определяется также способом размещения элементов на печатной плате. Однако такой расчет вполне пригоден для предварительной оценки.

Определение оптимальной структуры многоячейкового преобразователя

Как показали расчеты, зависимости основных технико-экономических показателей преобразователя от количества (мощности) ячеек имеют различный и довольно сложный характер, поэтому сведем выделенные показатели к аддитивному критерию, учитывающему частные критерии с соответствующими весовыми коэффициентами, и получим целевую функцию

$$F(N) = \sum_{i=1}^m k_i \frac{F_i(N)}{F_{i0}(N)}, \quad (7)$$

где $F_i(N)$ — значение i -го критерия;
 $F_{i0}(N)$ — нормирующий делитель (желаемое значение i -го критерия);
 k_i — весовой коэффициент i -го критерия ($\sum k_i = 1$);
 m — количество критериев ($m=3$).

В качестве нормирующих делителей будем использовать лучшие значения частных критериев, т. е. наименьшие значения мощности потерь, стоимости и объема конструкции преобразователя.

Весовые коэффициенты выбираются в каждом конкретном случае в зависимости от приоритетов. В нашем случае значимость их примерно одинакова, поэтому весовой коэффици-

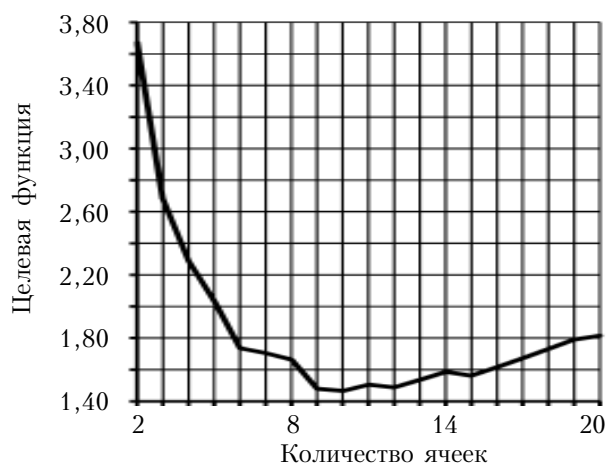


Рис. 5. График целевой функции

ент мощности потерь примем равным 0,3, стоимости — 0,4, объема конструкции — 0,3.

Оптимальной структуре многоячейкового преобразователя соответствует минимум целевой функции $F(N)$. Как видно из рис. 5, для заданных условий он достигается при $N=10$. Таким образом, для рассматриваемого транзисторного преобразователя, обеспечивающего предельный ток 500 А, при заданных значениях весовых коэффициентов основных выделенных критериев оптимальной является структура, состоящая из десяти ячеек, рассчитанных на максимальное значение тока 50 А.

Таким образом, полученная целевая функция для многоячейкового транзисторного преобразователя с комбинированным управлением установки контактной микросварки позволяет для заданных условий сварки определить оптимальные с точки зрения энергоэффективности, стоимости и объема конструкции количество и мощность ячеек.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зиновьев Г.С., Зотов Л.Г., Темлякова З.С. Пути эволюции многоуровневых инверторов напряжения // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 6. — 2008. — С. 58–69. [Zinov'ev G.S., Zotov L.G., Temlyakova Z.S. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotekhniki. Part 6. 2008. P. 58]
2. Khomfoi S., Tolbert L.M. Multilevel Power Converters. Power Electronics Handbook. — Elsevier, 2007.
3. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1986. [Moin V.S. Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli. Moscow. Energoatomizdat. 1986]
4. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высокочастотные транзисторные преобразователи. — М.: Радио и связь, 1988. [Romash E.M., Drabovich Yu.I., Yurchenko N.N., Shevchenko P.N. Vysokochastotnye tranzistornye preobrazovateli. Moscow. Radio i svyaz'. 1988]
5. А.с. 744933 СССР. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии / Д.И. Панфилов, В.С. Иванов, В.Н.

Сирик. — 30.06.1980. [A.s. 744933 SSSR. / D.I. Panfilov, V.S. Ivanov, V.N. Sirik. 30.06.1980]

6. Кадацкий А.Ф., Малявин И.П. Асимметрия электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры // Технология и проектирование в электронной аппаратуре. — 2008. — №3. — С. 7—14. [Kadatskii A.F., Malyavin I.P. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2008. N 3. P. 7]

7. Паэрланд Ю.Э., Бондаренко А.Ф., Бондаренко Ю.В. Транзисторный преобразователь постоянного тока с комбинированным управлением // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. — 2010. — С. 104—107. [Paerland Yu.E., Bondarenko A.F., Bondarenko Yu.V. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotekhniki. Part 3. 2010. P. 104]

8. Паэрланд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. Источник питания для контактной микросварки с программируемой формой сварочного импульса // Технология и проектирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 4. — С. 51—54. [Paerland Yu.E., Bondarenko A.F. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2006. N 4. P. 51]

9. Paerland Y.E., Bondarenko O.F., Bondarenko I.V. Multicell-type Transistor Converter with Combined Control for Micro Resistance Welding // 7th International Conf. Compatibility and Power Electronics. — Tallinn, Estonia. — 2011. — P. 309—314.

10. Бондаренко Ю.В. Оценка энергоэффективности многоэлектродного транзисторного преобразователя с комбинированным управлением // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1. — 2010. — С. 5—10. [Bondarenko Yu.V. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Silova elektronika ta energoeffektivnist'. Part 1. 2010. P. 5]

11. Головацкий В.А., Гулякович Г.Н., Конев Ю.И. и др. Источники вторичного электропитания. — М.: Радио и связь, 1990. [Golovatskii V.A., Gulyakovich G.N., Konev Yu.I. i dr. Istochniki vtorichnogo elektropitaniya. M. Radio i svyaz'. 1990]

12. International Rectifier <http://www.irf.com>.

13. US — Electronic Components Distributor Newark <http://www.newark.com>.

14. Интернет-магазин для радиолюбителей <http://www.ekits.ru>. [Internet-magazin dlya radiolyubitelei <http://www.ekits.ru>]

15. Электротехническое оборудование <http://www.voltus.com.ua>. [Elektrotekhnicheskoe oborudovanie <http://www.voltus.com.ua>]

16. Чип и Дип — электронные компоненты и приборы <http://www.chipdip.ru>. [Chip i Dip — elektronnyye komponenty i pribory <http://www.chipdip.ru>.]

17. Vishay — manufacturer of discrete semiconductors and passive components <http://www.vishay.com>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 07.11 2011 г.

Bondarenko Yu. V., Bondarenko A. F., Safronov P. S., Sydorets V. N. **Optimization of structure of multicell-type transistor converter.**

Keywords: transistor converter, multicell-type structure, combined control, optimization of structure, additive criterion.

To optimize the structure of multicell-type transistor converter with combined control it is proposed to use an additive criterion, which would take into account such particular criteria as efficiency, cost and construction volume of the converter.

Ukraine, Alchevsk, Donbass State Technical University, Paton Electric Welding Institute of NASU.

Бондаренко Ю. В., Бондаренко О. Ф., Сафронов П. С., Сидорець В. М. **Оптимізація структури багатокіркового транзисторного перетворювача.**

Ключові слова: транзисторний перетворювач, багатокіркова структура, комбіноване управління, оптимізація структури, адитивний критерій.

Для оптимізації структури багатокіркового транзисторного перетворювача з комбінованим керуванням запропоновано використовувати адитивний критерій, що враховує такі окремі критерії, як енергоефективність, вартість та об'єм конструкції перетворювача.

Україна, м. Алчевськ, Донбаський державний технічний університет, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ.

НОВЫЕ КНИГИ

Успехи нанотехнологий: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. — Москва: Техносфера, 2011. — 496 с.

Новейшие технологии включают в себя разработку, описание, а также производство и практическое использование самых разнообразных наноразмерных структур, устройств и систем. В междисциплинарном поле этой области исследований пересекаются экспериментальные и теоретические разработки химиков, физиков, инженеров-электронщиков, механиков, материаловедов, биохимиков, молекулярных биологов. Именно сочетание различных подходов и методов является характерной особенностью наиболее интересных и многообещающих разработок в нанотехнологиях. Книга представляет собой сборник последних результатов, полученных молодыми английскими учеными, многие из которых — стипендиаты Королевского общества или Исследовательского совета инженерных и физических наук Великобритании. Их работы ведутся на самых передовых рубежах познания, а в более широком контексте создают панораму современного состояния нанонауки и нанотехнологии вообще.

