

Л.Г.Зотов¹, В.П.Разинкин¹, А.Д.Мехтиев²,
Н.Т.Исембергенов³, В.В.Югай³, Г.Б.Валеева¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Россия;

²Карагандинский государственный технический университет;

³Казахский национальный технический университет им. Сатпаева, Алматы

(E-mail: slawa_v@mail.ru)

Повышающие преобразователи каскадного типа для автономных систем энергоснабжения

Предложены различные варианты реализации многотактного повышающего резонансного конденсаторного преобразователя (МКПКП) и МКПКП с повышенной частотой преобразования. Разобраны новые методы построения каскадных повышающих DC-DC конверторов на основе многотактных, конденсаторных преобразователей резонансного типа, позволяющие существенно уменьшить количество элементов силовой цепи при больших требуемых коэффициентах преобразования. Исследованы особенности их функционирования, получены выражения для расчета параметров их силовой цепи. Выведены уравнения, позволяющие рассчитывать режимы работы и выполнять выбор элементов силовой цепи всех видов МКПКП.

Ключевые слова: автономная система электроснабжения, двунаправленный конденсаторный преобразователь, многотактный конденсаторный повышающий преобразователь постоянного напряжения.

При разработке автономных систем электроснабжения (АСЭ) переменного тока [1] и систем обмена электрической энергией постоянного тока [2], работающих от низковольтных первичных источников постоянного тока, необходимы повышающие двунаправленные повышающе-понижающие DC-DC конверторы с большим коэффициентом преобразования. Решение данного вопроса осуществляется использованием многотактных каскадных повышающих конденсаторных преобразователей (МКПКП). Главные преимущества от других технических решений — высокий КПД, низкие амплитуды гармоник и минимальное количество силовых элементов. В настоящее время известны каскадные понижающие конденсаторные преобразователи [3–6].

Работа каскадных повышающих преобразователей основана на поэтапном увеличении уровня входного напряжения отдельными каскадами, каждый из которых представляет собой многотактный повышающий резонансный конденсаторный преобразователь [7–8], работающий на повышенной (несколько сотен килогерц) частоте преобразования. При этом коэффициент преобразования МКПКП оказывается равным произведению коэффициентов преобразования отдельных каскадов, что, в сущности, и позволяет свести к минимуму количество элементов его силовой цепи по сравнению с однокаскадным вариантом.

Принципиальная схема силовой цепи (СЦ) двухкаскадного трехтактного резонансного МКПКП с повышенной частотой преобразования (ПЧП) приведена на рисунке 1, а на рисунке 2 даны временные диаграммы, разъясняющие его работу.

В общем случае каскад под номером j состоит из k_j повышающих отдельных конденсаторных преобразователей (ОКП), содержащих каждый по n_j конденсаторных цепочек (КЦ). Принцип действия повышающего ОКП заключается в периодическом параллельном подзаряде конденсаторов его цепочек от первичного низковольтного источника E_n через зарядные ключи ($VT1.j - VT3.j$), с дальнейшим последовательным разрядом через разрядные ключи ($VT4.j - VT6.j$). Поскольку разряд конденсаторов в ОКП происходит через последовательно соединенный с ними первичный источник E_n , то их СЦ упрощается уменьшением числа КЦ на единицу.

В результате при числе каскадов, равном K , коэффициент преобразования МКПКП оказывается равным $K_n = \prod_{j=1}^K (n_j + 1)$. Минимум суммарного количества силовых элементов МКПКП $N_\Sigma = \sum_{j=1}^K n_j$ при заданном коэффициенте преобразования K_n достигается при $n_j = 1$, т.е. когда число конденса-

торов в ОКП всех каскадов равно единице. В результате при числе каскадов, равном K , коэффициент преобразования МКПКП оказывается равным $K_n = \prod_{j=1}^K (n_j + 1)$.

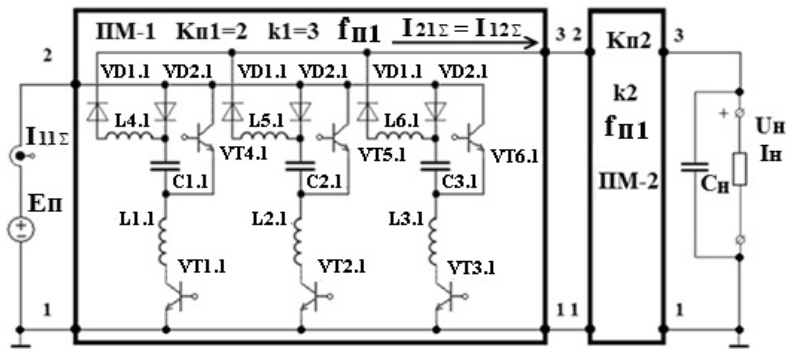


Рисунок 1. Принципиальная схема силовой цепи МКПКП (ПЧП)

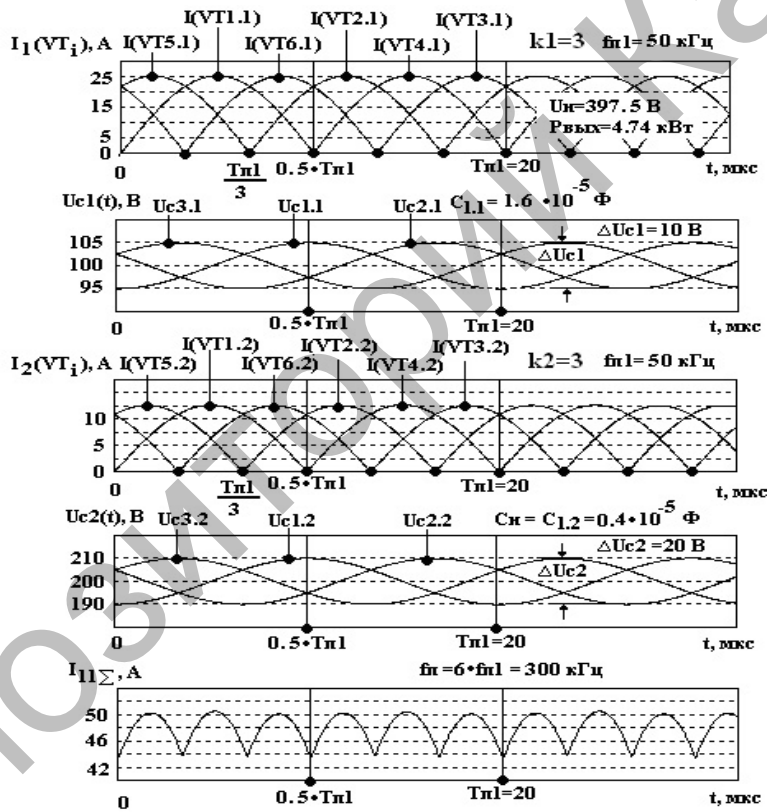


Рисунок 2. Временные диаграммы, поясняющие работу МКПКП (ПЧП)

Поэтому $K_n = 2^K$, $N_\Sigma = K$, а выигрыш, равный отношению количества элементов СЦ в обычном ($K=1$) и каскадном преобразователе, определяется выражением, проиллюстрированным в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

K	1	2	3	4	5
$K_{II} = 2^K$	2	4	8	16	32
$B_{N\Sigma(\text{ПЧП})}(K)$	1	1.33	2	3.2	5.33

$$B_{N\Sigma(nm)}(K) = \frac{n_1(K=1)}{1 + \sum_{j=1}^K n_j} = \frac{K_n}{1+K} = \frac{2^K}{1+K}.$$

В резонансных МКПКП (ПЧП) входной ток j -того каскада определяется суммой токов ОКП, входящих в его состав и имеющих форму кусочно-синусоидальных импульсов, равномерно распределенных по периоду частоты коммутации силовых ключей $f_{II} = \frac{1}{T_{n1}}$ и сдвинутых относительно друг друга на $\Delta t = \frac{T_{n1}}{k_j}$, как показано на рисунке 2. Количество ОКП в каскадах k_j определяет тактность МКПКП. Увеличение тактности приводит к пропорциональному увеличению выходной мощности МКПКП и уменьшению коэффициентов гармоник суммарных входных и выходных токов его каскадов $i_{j1\Sigma}(t)$, $i_{j2\Sigma}(t)$.

Заряд и разряд конденсаторов ОКП осуществляются кусочно-синусоидальными импульсами тока с одинаковой длительностью $\Delta t_s = \Delta t_p = 0.5 \cdot T_{n1}$ (рис. 2). При этом возможен эффект резкого снижения коэффициентов гармоник суммарных входного и выходного токов в каждом из каскадов — $i_{j1\Sigma}(t)$, $i_{j2\Sigma}(t)$ при нечетных значениях k_j [3–4] (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

$K_{\Gamma 1\Sigma} = \frac{I_{1j\Sigma\delta\sim}}{I_{1j\Sigma cp}} = K_{\Gamma 2\Sigma} = \frac{I_{2j\Sigma\delta\sim}}{I_{2j\Sigma cp}}$	
0.483455	0.60804
0.097759	0.042200
0.042200	0.015040
0.023451	0.003803

Полезное свойство МКПКП состоит в том, что при $n_j = 1$ токи через все силовые элементы в его каскадах оказываются одинаковыми по форме и величине, что упрощает задачу их выбора.

Нужные для расчета двухкаскадного МКПКП (ПЧП) амплитуды и средние значения токов через элементы СЦ, соответственно первого и второго каскадов, при условии $n_1 = n_2 = 1$ устанавливаются выражениями

$$I_1 = \frac{2 \cdot \pi}{k_1} \cdot I_H; \quad I_2 = \frac{\pi}{k_2} \cdot I_H; \quad I_{1(cp)} = \frac{2}{k_1} \cdot I_H; \quad I_{2(cp)} = \frac{1}{k_2} \cdot I_H,$$

где I_H — среднее значение выходного тока нагрузки МКПКП.

Средние значения суммарных токов на входе первого и второго каскадов равны

$$I_{11\Sigma(cp)} = 4 \cdot I_H, \quad I_{12\Sigma(cp)} = I_{21\Sigma(cp)} = 2 \cdot I_H.$$

Напряжения на закрытых транзисторных ключах и диодах соответственно первого и второго каскадов равны

$$\begin{aligned} U_{VT(1 \div k_1),1} &= E_n, \quad U_{VT(k_1+1, \div 2k_1),1} = E_n + 0.5 \cdot \Delta U_{C1}, \\ U_{VD(1 \div k_1),1} &= E_n + 0.5 \cdot \Delta U_{C1}, \quad U_{VD(k_1+1, \div 2k_1),1} = E_n, \\ U_{VT(1 \div k_1),2} &= 2 \cdot E_n, \quad U_{VT(k_1+1, \div 2k_1),2} = 2 \cdot E_n + 0.5 \cdot \Delta U_{C2}, \\ U_{VD(1 \div k_1),2} &= 2 \cdot E_n + 0.5 \cdot \Delta U_{C2}, \quad U_{VD(k_1+1, \div 2k_1),2} = 2 \cdot E_n, \end{aligned}$$

где ΔU_{C1} , ΔU_{C2} — соответственно заданные величины максимальных пульсаций напряжения на конденсаторах первого и второго каскадов на частоте f_{n1} и максимальном токе нагрузки I_{Hmax} .

Величины емкостей и индуктивностей в каскадах определяются соответствующими формулами:

$$C_1 = \frac{2 \cdot I_{Hmax}}{f_{n1} \cdot k_1 \cdot \Delta U_{C1}}, \quad C_2 = \frac{I_{Hmax}}{f_{n1} \cdot k_2 \cdot \Delta U_{C2}}, \quad L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{n1}^2 \cdot C_1}, \quad L_2 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{n1}^2 \cdot C_2}.$$

Для произвольного количества каскадов K общие выражения для амплитуд I_j средних значений токов $I_{j(cp)}$ через элементы СЦ, а также для средних суммарных входного $I_{1j\Sigma(cp)}$ и выходного $I_{2j\Sigma(cp)}$ токов j -того каскада имеют вид

$$I_j = \frac{\pi}{k_j} \cdot I_H \cdot 2^{(K-j)}; I_{j(cp)} = \frac{1}{k_j} \cdot I_H \cdot 2^{(K-j)};$$

$$I_{1j\Sigma(cp)} = 2^{(K+1-j)} \cdot I_H; I_{2j\Sigma(cp)} = 2^{(K-j)} \cdot I_H.$$

Средние величины напряжений на конденсаторах C_j каскадов равны $U_{C_j(cp)} = E_n \cdot 2^{(j-1)}$.

При этом напряжения на закрытых транзисторных ключах и диодах j -того каскада определяются следующими общими выражениями:

$$U_{VT(1 \pm k_1).j} = U_{VD(k_1+1, \pm 2k_1).j} = E_n \cdot 2^{(j-1)},$$

$$U_{VT(k_1+1, \pm 2k_1).j} = U_{VD(1 \pm k_1).j} = E_n \cdot 2^{(j-1)} + 0.5 \cdot \Delta U_{C_j},$$

где $\Delta U_{C_j} = \delta_{c_j} \cdot U_{C_j(cp)} = \delta_{c_j} \cdot E_n \cdot 2^{(j-1)}$ — максимальная заданная пульсация напряжения на конденсаторах j -того каскада на частоте преобразования f_{n1} при максимальном токе нагрузки I_{Hmax} ;

$\delta_{c_j} = \frac{\Delta U_{C_j}}{U_{C_j(cp)}}$ — допустимая относительная пульсация напряжения на конденсаторе C_j .

Величины емкостей конденсаторов и индуктивностей реакторов j -того каскада определяются из условия обеспечения заданных δ_{c_j} выражениями

$$C_j = \frac{2^{(K+1-2j)} \cdot I_{Hmax}}{f_{n1} \cdot k_j \cdot \delta_{c_j} \cdot E_n}; L_j = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{n1}^2 \cdot C_j}.$$

При одинаковых нечетных количествах ОКП в каскадах $k_j = k$ оценка максимальной величины коэффициента пульсации выходного напряжения на нагрузке осуществляется выражением

$$K_{nH(max)} = \frac{\Delta U_{Hmax}}{U_{H(cp)}} \cong K_{II2\Sigma} \cdot \frac{2}{\sqrt{1 + \left(2^{(K+1)} \cdot \pi \cdot f_{n1} \cdot k \cdot C_n \cdot \frac{E_n}{I_{Hmax}} \right)^2}}.$$

Особенность работы МКПКП (ПЧП) в том, что изменение уровня напряжения в каскадах происходит на высокой частоте f_{n1} , определяемой высоковольтными, и потому обладающими наихудшими частотными свойствами, ключами оконечного каскада. В результате габариты преобразователя оказываются несколько завышенными из-за неиспользованных возможностей по увеличению частот преобразования в низковольтных предыдущих каскадах.

Указанный недостаток устранен в МКПКП с повышенными и различными частотами преобразования (ПРЧП) (рис. 3). Временные диаграммы, поясняющие работу МКПКП (ПРЧП), приведены на рисунке 4.

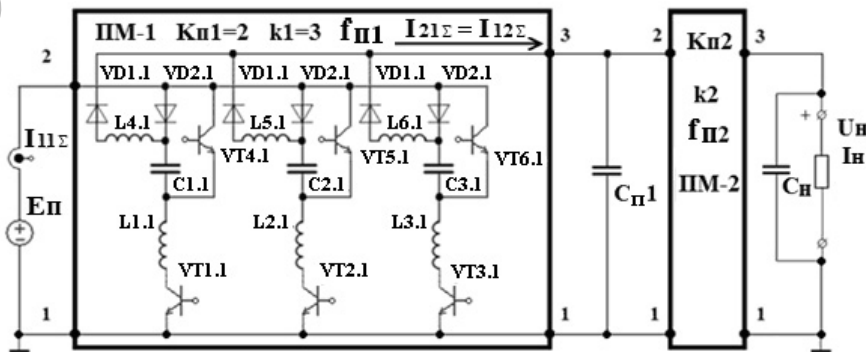


Рисунок 3. Принципиальная схема СЦ двухкаскадного МКПКП (ПРЧП)

В повышающих МКПКП (ПРЧП) частоты преобразования в каскадах различны, причем $f_{n1} > f_{n2} > \dots > f_{nK}$.

Конденсатор C_{n1} предназначен для обеспечения режима мягкой коммутации разрядных транзисторных ключей ($VT4.1, \dots, VT6.1$). Величина его емкости выбирается из условия

$$\frac{1}{k_j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{n1} \cdot C_{nj}} \ll R_{Hminj} = \frac{E_n \cdot 2^j}{I_{2\Sigma(cp)}} = \frac{E_n \cdot 2^j}{2^{(K-j)} \cdot I_{Hmax}}, \text{ т.е.}$$

$$C_{nj} \gg \frac{2^{(K-2-j)} \cdot I_{Hmax}}{k_j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{n1} \cdot E_n} = C_j \cdot \frac{\Delta U_{Cj}}{2 \cdot \pi \cdot E_n \cdot 2^j}.$$

Моделирование режимов работы МКПКП (ПРЧП) (рис. 4) для типовых технических условий показывает, что режим мягкой коммутации их разрядных ключей гарантированно обеспечивается при величинах $C_{nj} = C_j$.

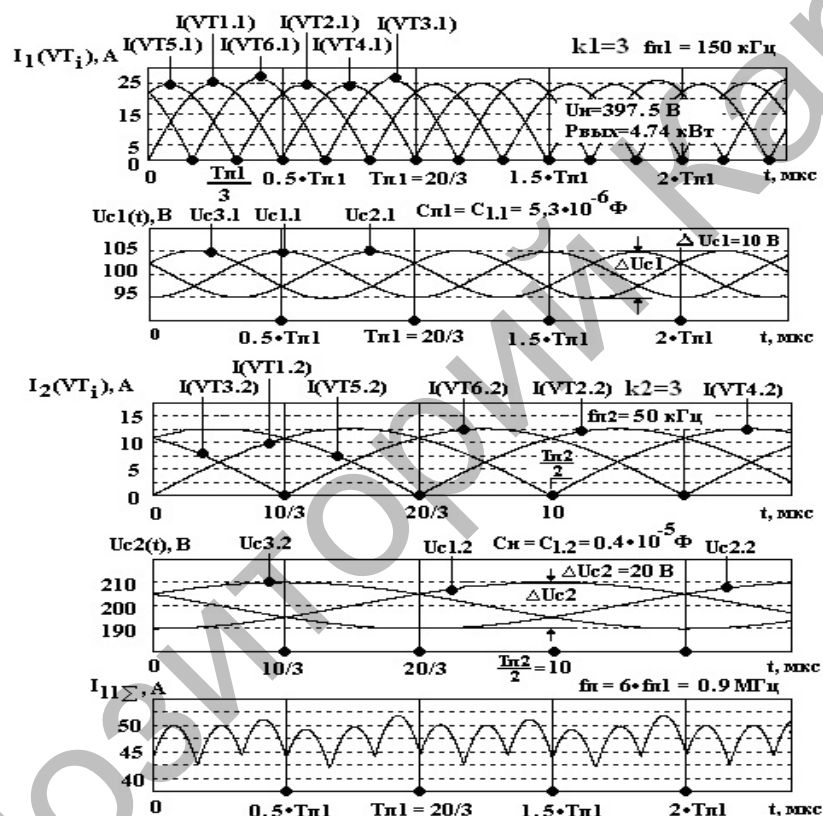


Рисунок 4. Временные диаграммы, поясняющие работу МКПКП (ПРЧП)

Все токи и напряжения в каскадах определяются выражениями, идентичными приведенным выше. Отличие состоит лишь в определении величин параметров элементов СЦ каскадов ввиду изменения их частот преобразования f_{nj} .

$$C_j = \frac{2^{(K+1-2-j)} \cdot I_{Hmax}}{f_{nj} \cdot k_j \cdot \delta_{cj} \cdot E_n}; L_j = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{nj}^2 \cdot C_j}.$$

Выражения для оценки выигрыша по величине суммарной емкости СЦ для МКПКП (ПЧП) и (ПРЧП) по сравнению с однокаскадным преобразователем, полученные при условии, что частоты f_{nj} в каскадах обратно пропорциональны напряжениям на их ключах $U_{VT(1 \pm k_j).j} = E_n \cdot 2^{(j-1)}$, и при одинаковых δ_{cj} и $k_j = k$, имеют вид

$$B_{C\Sigma(n_{\text{нн}})}(K) = \frac{C_{\Sigma}(K=1)}{\sum_{j=1}^K C_j} = \frac{2^K}{2^{(1-K)} + \sum_{j=1}^K 2^{(K+1-2j)}};$$

$$B_{C\Sigma(n_{\text{пн}})}(K) = \frac{C_{\Sigma}(K=1)}{\sum_{j=1}^K C_j} = \frac{2^K}{\sum_{j=1}^K \frac{f_{n1}}{f_{nj}} [2^{(K+2-2j)}]} = \frac{2^K}{\sum_{j=1}^K 2^{(2-j)}}.$$

Они изображены в таблице 3.

Таблица 3

K	1	2	3	4	5
$K_n = 2^K$	2	4	8	16	31
$B_{C\Sigma(n_{\text{нн}})}(K)$	1	1.333	1.455	1.488	1.497
$B_{C\Sigma(n_{\text{пн}})}(K)$	1	1.333	2.286	4.267	8.258

МКПКП (ПЧП) и (ПРЧП) способны работать в двунаправленном режиме. Для этого в ОКП их каскадов вместо обычных вводятся двунаправленные транзисторные ключи (VT1.1, VT7.1) и (VT4.1, VT10.1), как показано на рисунках 5 и 6.

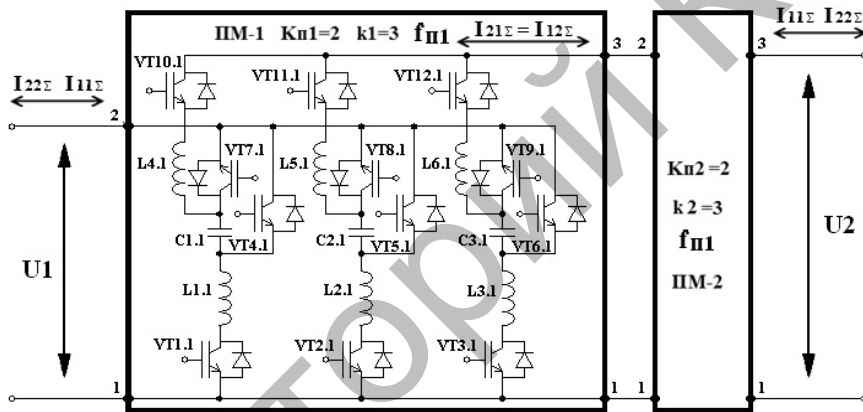


Рисунок 5. Принципиальная схема СЦ двунаправленного МКПКП (ПЧП)

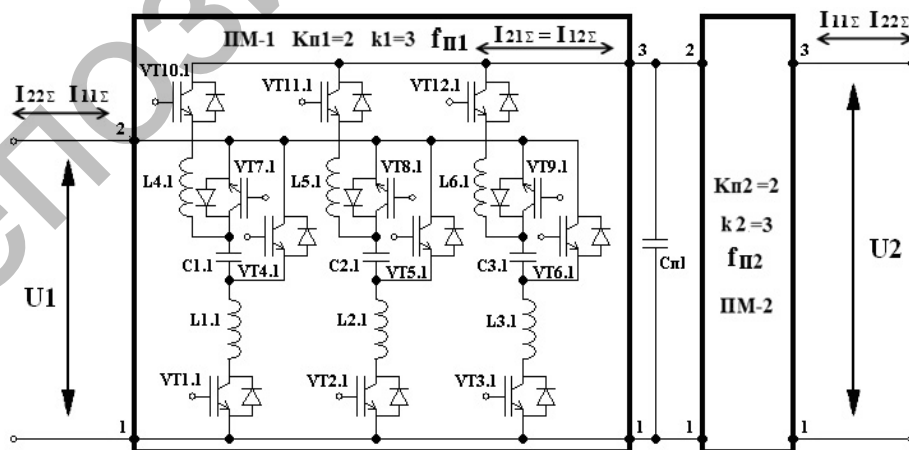


Рисунок 6. Принципиальная схема СЦ двунаправленного МКПКП (ПРЧП)

При этом в прямом направлении (слева направо) они работают как повышающие, а в обратном — как понижающие МКПКП, с коэффициентами преобразования $K_n = 2^K$, $K_n = 2^{-K}$ соответственно.

Выводы

Предложены различные варианты реализации МКПКП (ПЧП) и (ПРЧП). Показано, что при одинаковых условиях и числе каскадов $K > 2$ для реализации МКПКП (ПРЧП) требуется значительно меньшая суммарная емкость СЦ.

Предложен новый каскадный принцип построения резонансных конденсаторных повышающих преобразователей, разрешающий при высоком КПД существенно уменьшить количество элементов СЦ и значительно снизить коэффициенты гармоник его входного и выходного токов по сравнению с однокаскадным вариантом.

На основе MOSFET и IGBT транзисторов разработаны принципиальные схемы СЦ двунаправленных МКПКП (ПЧП) и (ПРЧП), позволяющие строить эффективные двухуровневые системы обмена электрической энергией постоянного тока для автономных АСЭ, питающихся от источников постоянного тока с существенно различными по уровню напряжениями.

Получены выражения, позволяющие рассчитывать режимы работы и выполнять выбор элементов СЦ всех видов МКПКП.

Список литературы

- 1 Зотов Л.Г. Автономная система энергоснабжения от солнечных модулей RZMP-240-T для объектов сельского хозяйства // Ползуновский вестник. — 2011. — № 2/1. — С. 87–94.
- 2 Зотов Л.Г. Двухуровневая система обмена электрической энергией постоянного тока на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных энергосистем // Электротехника. — 2011. — № 7. — С. 52–57.
- 3 А.с. СССР № 543109. Преобразователь переменного напряжения в постоянное / Браславский Л.М., Зотов Л.Г., Сажнев А.М. // БИ. — 1977. — № 2.
- 4 Браславский Л.М., Зотов Л.Г., Сажнев А.М. Каскадные бестрансформаторные низковольтные выпрямители // Полупроводниковая электроника в технике связи / Под ред. И.Ф.Николаевского. — 1977. — Вып. 18. — С. 112–122.
- 5 Зотов Л.Г., Золотарев И.В. Бестрансформаторный низковольтный выпрямитель каскадного типа с повышенным КПД // Приборы и техника эксперимента. — 1979. — № 3. — С. 154–159.
- 6 Зотов Л.Г., Шорин А.А. Каскадный бестрансформаторный преобразователь для децентрализованной системы электропитания // Радиотехника. — 1989. — № 10. — С. 24–32.
- 7 Пат. RU № 2394345. Регулируемый повышающий преобразователь постоянного напряжения / Зотов Л.Г. // БИ. — 2010. — № 19.
- 8 Зотов Л.Г. Конденсаторные повышающие преобразователи с изменяющейся структурой для автономных энергосистем // Электротехника. — 2011. — № 4. — С. 46–50.

Л.Г.Зотов, В.П.Разинкин, А.Д.Мехтиев, Н.Т.Исембергенов, В.В.Югай, Г.Б.Валеева

Электржабдықтаудың автономды жүйесі үшін жоғарылату каскадты түрлендіргіштер

Мақалада жоғары жиілікті түрлендіргіші бар КПКК мен көптактілі, жоғарылатқыш, резонансты, конденсаторлы түрлендіргішті қолданудың әр түрлі нұсқасы ұсынылды. Күш тізбегінің түрлендіру коэффициенті жоғары болуы талап етілген кезде элементтердің санын азайтуды болдыратын резонансты конденсаторлы көптактілі түрлендіргіштер негізіндегі DC-DC каскадты жоғарылатқыш конвертерлердің жаңа әдістері талданған. Олардың жұмыс ерекшелігі зерттеліп, күш тізбегінің параметрлерін есептеулер көрсеткіштері алынған. КПКК барлық түрінің күш тізбегінің элементін таңдау және жұмысын есептеу үшін теңдеулер келтірілген.

L.G.Zotov, V.P.Razinkin, A.D.Mehtiyev, N.T.Isembergenov, V.V.Yugay, G.B.Valeyeva

Boost converters cascade type for autonomous power supply systems

Proposed various embodiments Multicycle, enhancing, resonant, condenser transducer (MERCT) and MERCT with increased frequency conversion. Disassembled new methods for constructing cascade enhancing DC-DC converters based on Multicycle, capacitor resonant type converters to significantly reduce the number of elements in the power circuit required for large transform coefficients. The features of their operation, the expressions for calculating the parameters of the main circuit. Equations possible to calculate the operating mode and the selection of elements of the main circuit all kinds MERCT.

References

- 1 Zotov L.G. *Polzunov herald*, 2011, 2/1, p. 87–94.
- 2 Zotov L.G. *Electrical engineering*, 2011, 7, p. 52–57.
- 3 A.s. USSR № 543109. *Bull. of Invent.*, 1977, 2.
- 4 Braslavsky L.M., Zotov L.G., Sazhnev A.M. *SCE in communications technology*, ed. I.F.Nikolayevskiy, 1977, 18, p. 112–122.
- 5 Zotov L.G., Zolotarev I.V. *Instruments and experimental techniques*, 1979, 3, p. 154–159.
- 6 Zotov L.G., Shorin A.A., *Radio*, 1989, 10, p. 24–32.
- 7 Pat. RU № 2394345. *Bull. of Invent.*, 2010, 19.
- 8 Zotov L.G. *Electrical engineering*, 2011, 4, p. 46–50.

Репозиторий КарГУ