

УДК 621.314

С.В. Брованов, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко

## Полупроводниковый преобразователь с подавлением синфазного тока утечки для систем генерирования электрической энергии на базе фотоэлектрических модулей

Показаны причины возникновения синфазного тока утечки в автономных системах генерирования электрической энергии с использованием солнечных фотоэлектрических модулей. Отмечено, что основной причиной формирования синфазного тока утечки является наличие гармонического синфазного напряжения на выходных зажимах системы генерирования. Для подавления синфазного тока утечки предложено решение в виде новой схемной реализации силового полупроводникового преобразователя и его алгоритма векторной ШИМ. Это позволило сделать синфазное напряжение постоянным, устремив, таким образом, синфазный ток утечки к нулю. В работе проведено имитационное моделирование, подтверждающее эффективность предложенного решения.

**Ключевые слова:** многоуровневый полупроводниковый преобразователь, синфазное напряжение, синфазный ток утечки, солнечный фотоэлектрический модуль, широтно-импульсная модуляция.

На сегодняшний день с увеличением объема потребления электрической энергии становится важным вопрос, связанный с недостатком генерационных мощностей. Данная проблема остро дает о себе знать в удаленных и сельских районах, где ее решение осуществляется за счет веерного отключения электрической энергии или подачи ее по временному графику. При этом следует отметить, что основными потребителями электрической энергии в этих районах, как правило, выступают частные и фермерские хозяйства, которым требуются однофазные сети небольшой мощности.

Одним из решений по стабильному обеспечению в данных районах электрической энергии может быть применение автономных систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ), в частности, на базе солнечных фотоэлектрических модулей и полупроводниковых преобразователей [1–4]. При этом тенденция развития данных СГЭЭ связана с использованием многоуровневых полупроводниковых преобразователей, которые позволяют в значительной степени повысить качество генерируемой электрической энергии и снизить массогабаритные показатели [5–8].

Структура СГЭЭ на базе солнечных фотоэлектрических модулей и многоуровневых полупроводниковых преобразователей зачастую имеет в своем составе трансформатор. В ряде случаев, когда нет принципиальных требований к присутствию в структуре СГЭЭ трансформатора, его из структуры убирают. Это позволяет снизить стоимость и массогабаритные показатели СГЭЭ. Однако это в свою очередь приводит к появлению синфазного тока утечки [9–12], который протекает через контуры, включающие в себя паразитные емкости и индуктивности (рис. 1). Наличие синфазного тока утечки приводит к снижению качества формируемого преобразователем выходного напряжения и тока, а также является причиной выхода из строя тонкопленочных солнечных фотоэлектрических модулей и создает угрозу поражения электрическим током обслуживающего персонала.

Известны способы подавления синфазного тока, такие как введение разделительного конденсатора [13] или установка дополнительных ключей в схему преобразователя, которые позволяют отключать звено постоянного тока от нагрузки в некоторые интервалы времени, обусловленные алгоритмом работы СГЭЭ [14–15]. Но данные способы лишь снижают уровень синфазного тока и не позволяют полностью его устранить. В связи с этим в данной работе предложено одно из решений, позволяющих осуществить полное подавление синфазного тока.

**Синфазный ток утечки.** Проведем анализ влияния параметров элементов СГЭЭ на формирование синфазного тока утечки.

На рис. 1 представлена структура СГЭЭ, в которой не содержится трансформатор. Также на рисунке приведены элементы, наличие которых в определенной степени оказывают влияние на формирование синфазного тока утечки [12].

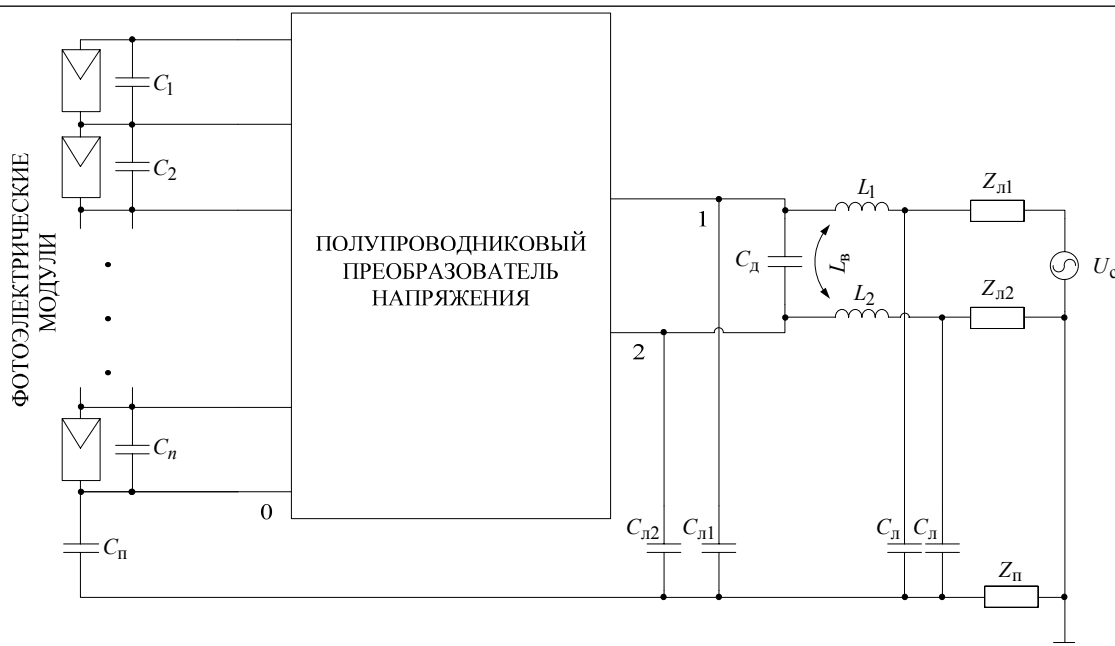


Рис. 1. Структура СГЭЭ без трансформатора

К ним относятся:  $C_{\text{п}}$  – эквивалентная паразитная емкость солнечных фотоэлектрических модулей. Величина данной емкости зависит от многих факторов, среди которых влажность, давление, запыленность окружающей среды, но в среднем ее величина оценивается из расчета 100 нФ на 1 кВт мощности фотоэлектрического модуля;  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности фильтрующих дросселей;  $L_{\text{в}}$  – взаимная индуктивность, обусловленная наличием явления взаимоиндукции между элементами  $L_1$  и  $L_2$ ;  $Z_{\text{л1}}$  и  $Z_{\text{л2}}$  – комплексные сопротивления подводящих линий к сети;  $Z_{\text{п}}$  – комплексное сопротивление контура утечки;  $C_{\text{л}}$  – паразитная емкость между подводящей линией и землей;

$C_{\text{д}}$  – паразитная емкость между подводящими линиями;  $C_{\text{л1}}$  и  $C_{\text{л2}}$  – паразитные емкости между выводами полупроводникового преобразователя и землей, обусловленные наличием связи между полупроводниковым ключом и его заземленным радиатором;  $C_{\text{п}}$  – паразитная емкость между землей и фотоэлектрическим модулем.

Для получения схемы замещения СГЭЭ введем понятие эквивалентных источников напряжений  $U_{10}$ ,  $U_{20}$ , формирующихся на зажимах «1» и «2» относительно шины «0», которые характеризуют преобразование напряжений фотоэлектрических модулей посредством полупроводникового преобразователя.

Наличие источников  $U_{10}$  и  $U_{20}$  приводит к формированию на зажимах «1» и «2» синфазного  $U_{\text{син}}$  и дифференциального  $U_{\text{диф}}$  напряжений вида

$$U_{\text{син}} = \frac{U_{10} + U_{20}}{2}, U_{\text{диф}} = U_{10} - U_{20}. \quad (1)$$

Выражая из (1) напряжения  $U_{10}$  и  $U_{20}$ , получаем

$$U_{10} = U_{\text{син}} + \frac{U_{\text{диф}}}{2}, U_{20} = U_{\text{син}} - \frac{U_{\text{диф}}}{2}. \quad (2)$$

Отметим тот факт, что  $(2C_{\text{л}} + C_{\text{л1}} + C_{\text{л2}}) \ll C_{\text{п}}$  и  $(Z_{\text{л1}} + Z_{\text{л2}}) \ll Z_{\text{п}}$ , следовательно, элементы  $C_{\text{л}}$ ,  $C_{\text{л1}}$ ,  $C_{\text{л2}}$ ,  $Z_{\text{л1}}$ ,  $Z_{\text{л2}}$  не будут оказывать какого-нибудь существенного влияния на формирование синфазного тока утечки, учитывая, что  $U'_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{диф}}(L_2 - L_1)}{2(L_2 + L_1)}$  – дифференциальное напряжение,

зависящее от разницы значений индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$ .  $L_{12} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$  – эквивалентная индуктивность дросселей в контуре.

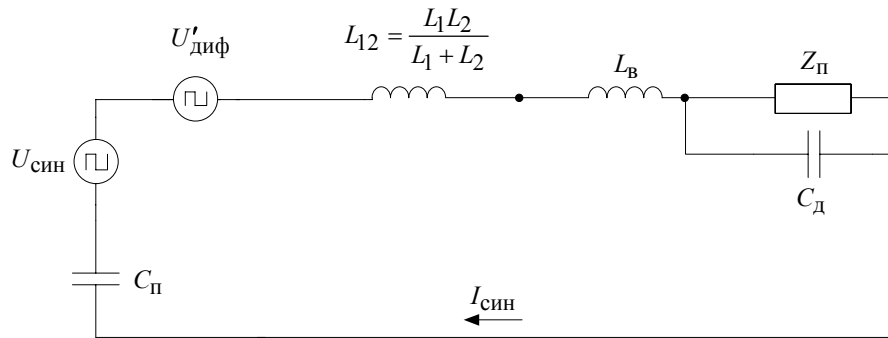


Рис. 2. Схема замещения СГЭЭ

Как видно из рис. 2, причиной возникновения синфазного тока утечки является наличие в контуре источников синфазного и дифференциального напряжений –  $U_{\text{син}}$ ,  $U'_{\text{диф}}$ . При этом если обеспечить равные значения величин индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$ , то  $U'_{\text{диф}}$  может быть обнулено и не будет оказывать влияние на формирование синфазного тока утечки. Однако присутствие в контуре источника синфазного напряжения  $U_{\text{син}}$  приводит к возникновению синфазного тока утечки, который определяется как

$$I_{\text{син}} = \frac{U_{\text{син}}}{\frac{1}{2\pi f C_{\text{п}}} + 2\pi f(L_{12} + L_{\text{в}}) + \frac{Z_{\text{п}}}{2\pi f C_{\text{д}} Z_{\text{п}} + 1}}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота синфазного напряжения.

Из соотношения (3) видно, что при  $f=0$  имеем  $\frac{1}{2\pi f C_{\text{п}}} = \infty$ , а следовательно,  $I_{\text{син}} = 0$ .

Таким образом, важным моментом для обеспечения  $I_{\text{син}} = 0$  является устранение переменной составляющей в синфазном напряжении. В дальнейшем в данной работе предложено решение, которое позволяет это осуществить.

**Подавление синфазного тока утечки.** Однофазные СГЭЭ, как правило, имеют небольшую установленную мощность. Поэтому их силовая часть может быть реализована на базе однофазной трехуровневой схемы с фиксирующими диодами. В ряде случаев для управления преобразователем применяют векторный способ ШИМ, который позволяет просто реализовывать баланс напряжений на конденсаторах звена постоянного тока. Известно, что управление преобразователем с векторным способом ШИМ основано на принципе использования комбинаций состояний ключей (КСК). При этом выбор последовательности КСК должен отвечать требованию синтеза задающего вектора  $\vec{V}^*$  и баланса напряжений на конденсаторах звена постоянного тока.

Для однофазного трехуровневого преобразователя набор КСК следующим образом:  $(X; Y)$ , где  $X$  отражает узел соответствующего конденсатора звена постоянного тока, подключенного к выводу 1, а  $Y$  – к выводу 2 преобразователя.

В процессе синтеза  $\vec{V}^*$  синфазное напряжение принимает пять различных уровней  $U_{\text{син}} \in \left\{ U_{\text{DC}}; \frac{U_{\text{DC}}}{2}; \frac{3U_{\text{DC}}}{4}; \frac{U_{\text{DC}}}{4}; 0 \right\}$ , что приводит к возникновению синфазного тока утечки  $I_{\text{син}}$ .

Для решения ранее поставленной задачи по подавлению синфазного тока утечки необходимыми являются два условия:

- 1) Для любого значения дифференциального напряжения  $U_{\text{диф}} \in \left\{ U_{\text{DC}}; \frac{U_{\text{DC}}}{2}; 0; -\frac{U_{\text{DC}}}{2}; -U_{\text{DC}} \right\}$ ,

формирующегося при заданной последовательности КСК, необходимо обеспечить такое синфазное напряжение, которое имело бы постоянный уровень, т.е.  $f=0$ , и не зависело от КСК на всем периоде синтеза  $\vec{V}^*$ .

- 2) Напряжения, формирующиеся на зажимах «1» и «2», должны изменяться в пределах  $0 \leq U_{10} \leq U_{\text{DC}}$ ,  $0 \leq U_{20} \leq U_{\text{DC}}$ .

Нетрудно показать, что этим условиям удовлетворяют только решения для систем уравнений, записанных для пяти значений дифференциального напряжения и только при одном уровне синфазного сигнала  $U_{\text{син}} = \frac{U_{dc}}{2}$ . В качестве решений в таблице представлены уровни напряжений  $U_{10}$  и  $U_{20}$ , а также соответствующие им КСК.

Таким образом, из таблицы видно, что в СГЭЭ для подавления синфазного тока утечки однофазный трехуровневый преобразователь должен быть модернизирован в новое преобразовательное устройство, удовлетворяющее следующим условиям:

- Число уровней напряжений в звене постоянного тока преобразователя должно быть равно четырем. В преобразователе должна быть возможность осуществлять коммутацию данных уровней.
- Алгоритм управления в преобразователе должен содержать в себе КСК, представленный в таблице.

**Комбинации состояний ключей**

Система уравнений	$\begin{cases} \frac{U_{10}+U_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ U_{10}-U_{20} = U_{DC} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{U_{10}+U_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ U_{10}-U_{20} = \frac{U_{DC}}{2} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{U_{10}+U_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ U_{10}-U_{20} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{U_{10}+U_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ U_{10}-U_{20} = -\frac{U_{DC}}{2} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{U_{10}+U_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ U_{10}-U_{20} = -U_{DC} \end{cases}$
$U_{\text{син}}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$
$U_{\text{диф}}$	$U_{DC}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	0	$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-U_{DC}$
$U_{10}$	$U_{DC}$	$\frac{3U_{DC}}{4}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{4}$	0
$U_{20}$	0	$\frac{U_{DC}}{4}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{3U_{DC}}{4}$	$U_{DC}$
КСК	(4;0)	(3;1)	(2;2)	(1;3)	(0;4)

На рис. 3 представлена векторная диаграмма, отражающая образующие векторы новых КСК, а на рис. 4 представлен преобразователь, который удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. Коммутаторы  $SA_1 - SA_6$  представляют собой двунаправленные ключи, реализованные, как представлено на рис. 4. Остальные варианты построения двунаправленных ключей предложены в работе [16]. На рис. 5 представлены временные диаграммы, поясняющие алгоритм работы предложенного однофазного преобразователя. Можно заметить, что при синтезе задающего вектора  $\vec{V}^*$  с применением предложенной последовательности КСК позволяет сформировать требуемое синфазное напряжение.

Таким образом, предложенный однофазный преобразователь с применением предложенной последовательности комбинаций состояния ключей соответствует требованиям по подавлению синфазного тока утечки. То есть формирует постоянное синфазное напряжение  $U_{\text{син}}$  (с частотой  $f=0$ ), но при этом дифференциальное напряжение  $U_{\text{диф}}$  остается знакопеременным ступенчатым и промодулированным по синусоидальному закону.

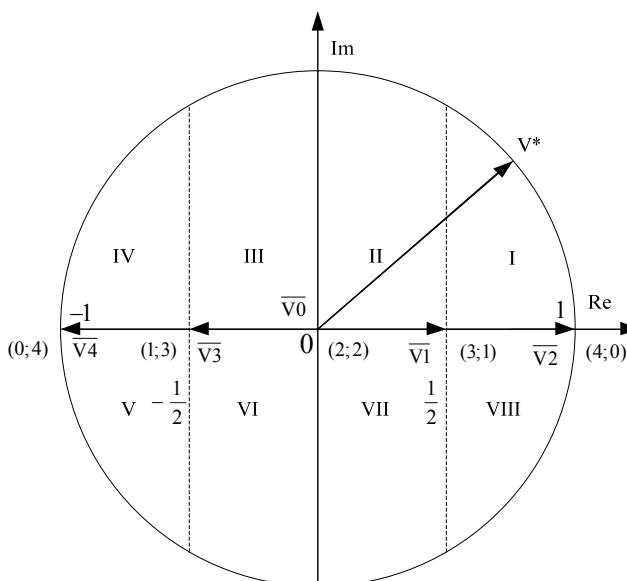


Рис. 3. Векторная диаграмма

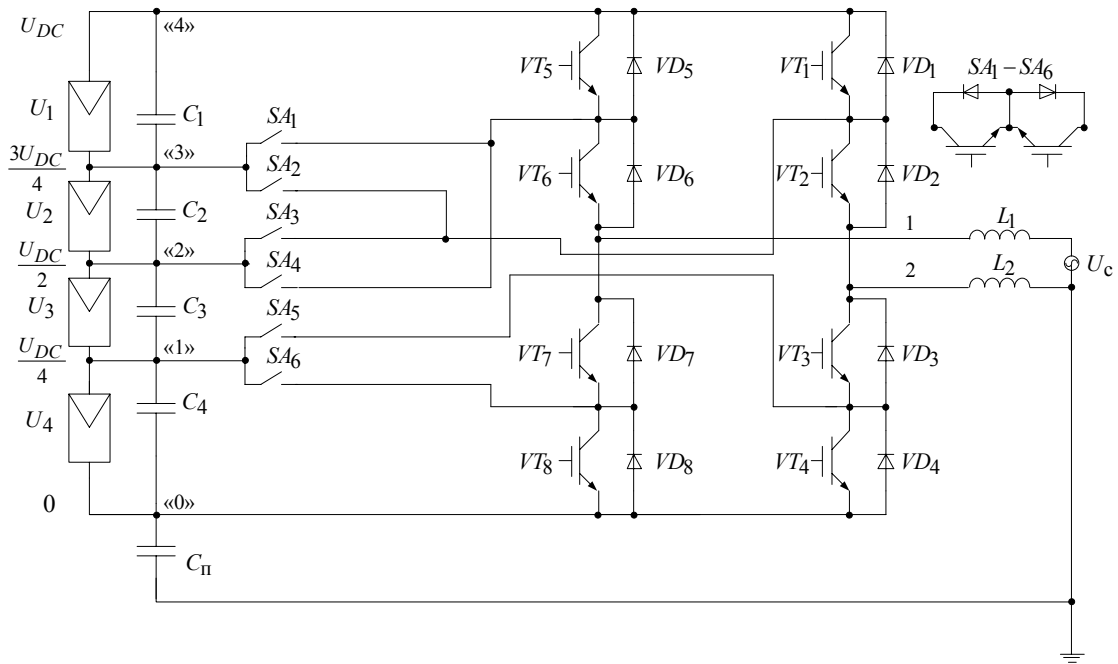


Рис. 4. Схема преобразователя с подавлением синфазного тока утечки

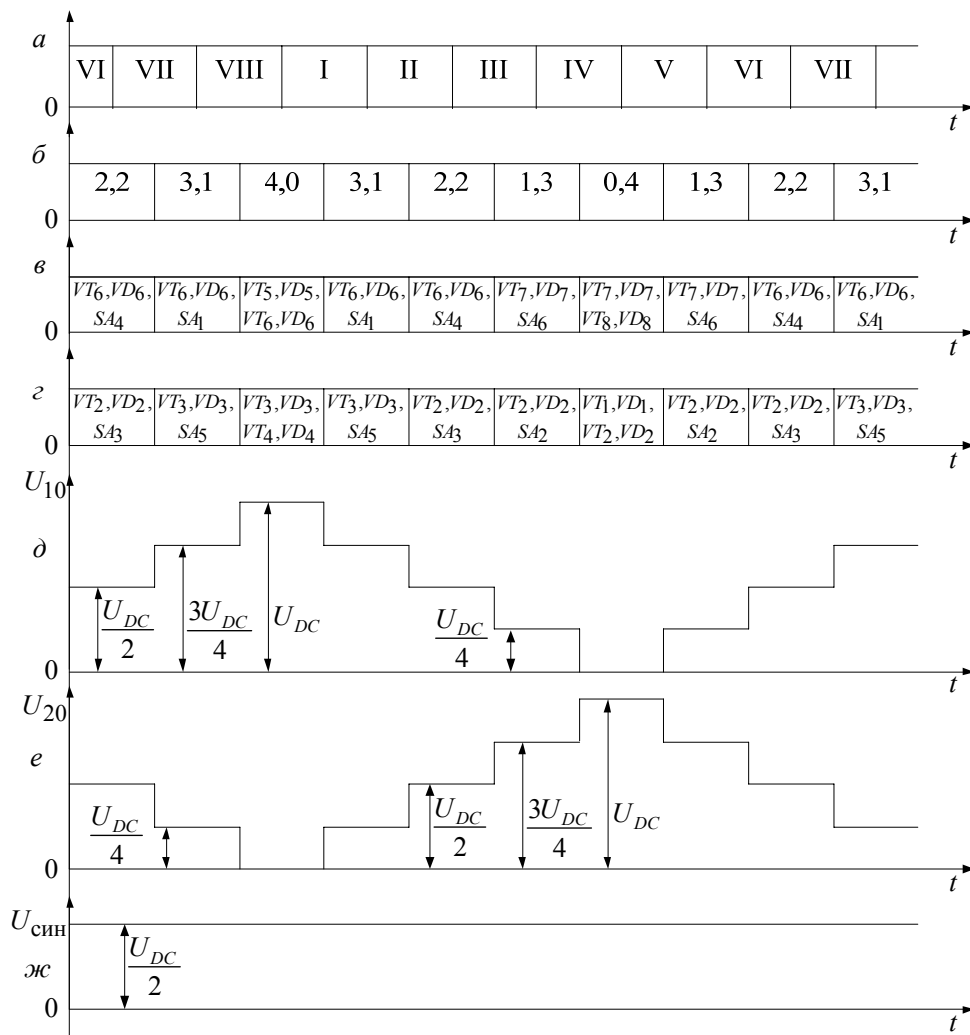


Рис. 5. Временные диаграммы, поясняющие алгоритм работы преобразователя: а – сектора; б – КСК; в – коммутируемые ключи и транзисторы 1-й стойки; г – коммутируемые ключи и транзисторы 2-й стойки; д –  $U_{10}$ ; е –  $U_{20}$ ; ж –  $U_{\text{син}}$

На рис. 6 представлены эпюры тока сети, синфазного тока утечки и синфазного напряжения в СГЭЭ на базе однофазного трехуровневого преобразователя, работающего на сеть без подавления синфазного тока утечки, полученные путем имитационного моделирования в ПО Power Sim. Видно, что синфазное напряжение имеет переменный характер. Синфазный ток значительно ухудшает генерируемый преобразователем ток.

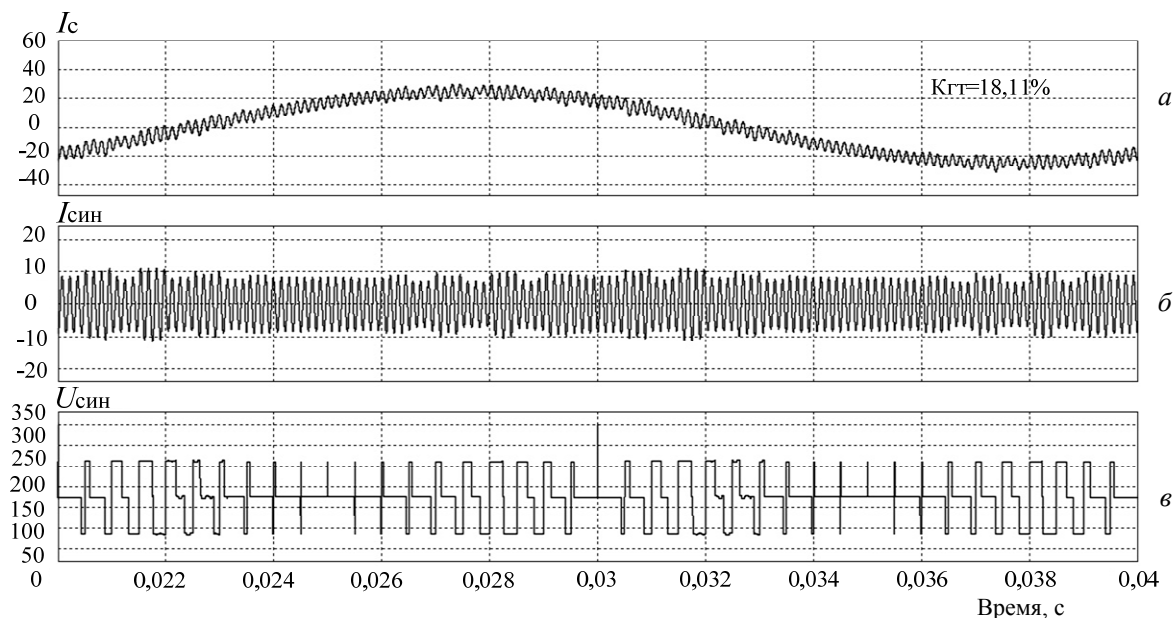


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжения без подавления синфазного тока утечки:  
а – ток сети; б – синфазный ток утечки; в – синфазное напряжение

На рис. 7 представлены эпюры тока сети, синфазного тока утечки и синфазного напряжения в СГЭЭ на базе новой топологии преобразователя, работающего на сеть с подавлением синфазного тока утечки, полученные путем имитационного моделирования в ПО Power Sim. Из сравнения диаграмм видно, что предложенное решение позволило получить постоянное синфазное напряжение, а следовательно, подавить синфазный ток утечки.

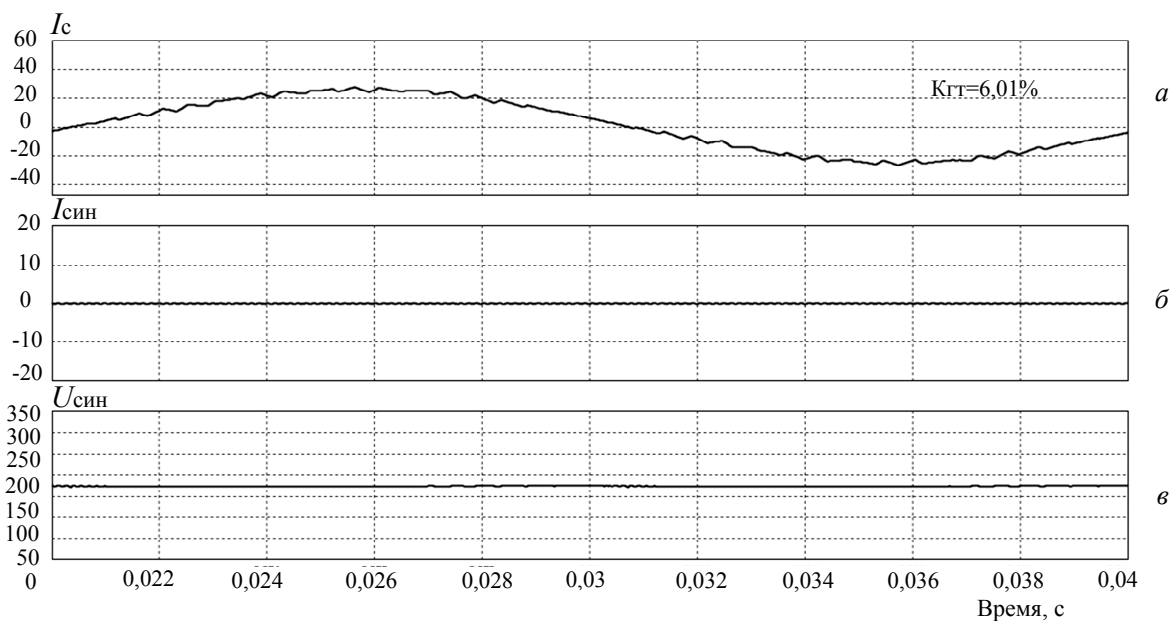


Рис. 7. Диаграммы токов и напряжения с подавлением синфазного тока утечки:  
а – ток сети; б – синфазный ток утечки; в – синфазное напряжение

**Заключение.** В процессе проведенной работы была синтезирована новая топология пятиуровневого полупроводникового преобразователя и предложен алгоритм векторной широтно-

импульсной модуляции для управления данным преобразователем. Результаты моделирования в среде Power Sim подтвердили возможность полного исключения синфазного тока утечки и улучшения качества генерируемого тока в сеть. Это в свою очередь дает основание пролагать, что реализация автономных систем генерирования электрической энергии с использованием предложенного типа полупроводникового преобразователя позволит улучшить функциональные и эксплуатационные характеристики СГЭЭ.

#### *Литература*

1. Zhang L. A family of neutral point clamped full-bridge topologies for transformerless photovoltaic grid-tied inverters / L. Zhang, K. Sun, L. Feng, H. Wu, Y. Xing // *Power Electronics, IEEE Transactions on.* – 2013. – Vol. 28, № 2. – P. 730–739.
2. Single-phase hybrid clamped three-level inverter based photovoltaic generation system / A. Chen, W. Wang, C. Du, C. Zhang // *Power Electronics for Distributed Generation Systems 2-nd IEEE International Symposium on.* – 2010. – P. 635–638.
3. Equalization of dc bus voltage in three-level NPC half-bridge inverters for PV applications by even harmonics injection or fundamental phase modulation / R. Petrella, N. Buonocunto, A. Revelant, P. Stocco // *Energy Conversion Congress and Exposition.* – 2011. – P. 3427–3434.
4. Anandababu C. Improved full-bridge neutral point clamped transformerless inverter for photovoltaic grid-connected system / C. Anandababu, B.G. Fernandes // *Industrial Electronics Society, IECON 39th Annual Conference of the IEEE.* – 2013. – P. 7996–8001.
5. A New Approach for Current Calculation in a Single-phase Three-level NPC Converter with Space Vector PWM / S. Brovanov, S. Kharitonov, M. Dybko, E. Grishanov // *Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), IEEE Region 8 International Conference.* – 2010. – P. 639–644.
6. Брованов С.В. Анализ способов баланса напряжений на конденсаторах звена постоянного тока в однофазном трехуровневом преобразователе / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов // *Научный Вестник НГТУ.* – 2015. – № 1(58). – С. 213–230.
7. Брованов С.В. Комбинации состояний ключей и анализ электромагнитных процессов в многоуровневых преобразователях // *Электротехника.* – 2009. – № 6. – С. 20–27.
8. Брованов С.В. Анализ скалярной и векторной широтно-импульсных модуляций для однофазных многоуровневых полупроводниковых преобразователей с фиксирующими диодами / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов // *Доклады АН ВШ РФ.* – 2014. – № 4(25). – С. 47–55.
9. Xiao H. Leakage current analytical model and application in single-phase transformerless photovoltaic grid-connected inverter / H. Xiao, S. Xie // *Electromagnetic Compatibility. IEEE Transactions on.* – 2010. – Vol. 52, № 4. – P. 902–913.
10. Leakage current elimination mechanism for photovoltaic grid-tied inverters / X. Shi, T. Tang, J. Xu, R. Huang // *Industrial Electronics Society. 39-th Annual Conference of the IEEE.* – 2013. – P. 955–960.
11. A high efficiency and reliability single-phase photovoltaic micro-inverter with high magnetics utilization for nonisolated AC-module applications / B. Chen, B. Gu, J.S. Lai, W. Yu // *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).* – 2013. – P. 2406–2411.
12. Ground currents in single-phase transformerless photovoltaic systems / E. Gubia, P. Sanchis, A. Ursua, J. Lopez // *Progress in photovoltaics: research and applications.* – 2007. – Vol. 15, №7. – P. 629–650.
13. Ground leakage current elimination in a transformerless unipolar modulation based single phase grid-connected photovoltaic system / A. Datta, G. Bhattacharya, D. Mukherjee, H. Saha // *Power and Energy Engineering Conference. IEEE PES Asia. – Pacific.* – 2013. – P. 1–5.
14. Comparison and Analysis of Single-Phase Transformerless Grid-Connected PV Inverters / T.K.S. Freddy, N.A. Rahim, W. Hew, H.S. Che // *Power Electronics, IEEE Transactions on.* – 2014. – Vol. 29, № 10. – P. 5358–5369.
15. Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application / O. Lopez, R. Teodorescu, F. Freijedo, J. Doval-Gandoy // *Energy Conversion. IEEE Transactions on.* – 2010. – Vol. 25, № 1. – P. 140–147.
16. Брованов С.В. Классификация многоуровневых полупроводниковых преобразователей электрической энергии с емкостным делителем напряжения // *Научный вестник НГТУ.* – 2011. – №4(45). – С. 132–136.

**Брованов Сергей Викторович**

Д-р техн. наук, зав. каф. вычислительной техники (ВТ)  
Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)  
Тел.: 8 (383-3) 46-11-33  
Эл. почта: brovanov@corp.nstu.ru

**Гришанов Евгений Валерьевич**

Аспирант каф. ВТ  
Тел.: 8 (383-3) 46-11-33  
Эл. почта: grev88@yandex.ru

**Дыбко Максим Александрович**

Канд. техн. наук, доцент каф. электроники и электротехники (ЭЭ) НГТУ  
Тел.: 8 (383-3) 46-11-33  
Эл. почта: dybko@corp.nstu.ru

Brovanov S.V., Grishanov E.V., Dybko M.A.

**A New Multilevel Converter for PV Power Generation Systems with Leakage Current Suppression**

This paper studies major reasons causing the common-mode leakage current flow in a photovoltaic (PV) power generation system. It is noted that the main reason for the formation of a common-mode leakage current is the presence of harmonic common-mode voltage at the output terminals generation system. To suppress the common mode leakage current usage of a new topology of a single-phase multilevel power converter and specified space vector PWM strategy are suggested. This solution has made it possible to keep the common-mode voltage constant and reduce the leakage current to zero. A simulation model is given to prove the effectiveness of the presented multilevel topology and its PWM strategy.

**Keywords:** multilevel voltage source converters, common-mode voltage, common-mode leakage current, photovoltaic power generation system, space vector pulse width modulation.