

ЭПТ 2018



ACED 2018

УДК 621.314.263

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ДВУНАПРАВЛЕННОГО DC-DC  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СОСТАВЕ  
ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**INVESTIGATION OF OPERATION MODES OF  
BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER IN DC  
COUPLED PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

**Плотников Юрий Валерьевич**, к-т. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Браславский Исаак Яковлевич**, доктор техн. наук, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Атаманкин Глеб Богданович**, студент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: atamankinglebos@gmail.com, Тел.: +7 (912) 678-23-04

**Iurii V. Plotnikov**, candidate of technical sciences, associate professor, department of « Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Isaak Ya. Braslavskiy**, doctor of technical sciences, professor, department of « Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Gleb B. Atamankin**, student, department of «Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: atamankinglebos@gmail.com, Тел.: +7 (912) 678-23-04

**Аннотация:** В статье рассматривается дискретная математическая модель двунаправленного DC-DC преобразователя. Данный DC-DC преобразователь применяется для заряда аккумуляторной батареи в гибридных фотогальванических системах электроснабжения. На основании разработанной дискретной модели DC-DC преобразователя и модели свинцово – кислотной аккумуляторной батареи рассматриваются режимы работы преобразовательного устройства фотогальванической системы с общей шиной постоянного тока. Приведены результаты моделирования переходных процессов в звене постоянного тока преобразовательного устройства фотогальванической системы, DC-DC преобразователе и аккумуляторной батарее.

**Abstract:** In the article discrete mathematical model of bidirectional DC-DC converter is considered. The DC-DC converter is used for battery charge in hybrid on-grid photovoltaic systems. Based on developed discrete model of DC-DC converter and model of lead-acid battery the operation modes of DC coupled photovoltaic system converter are considered. Simulation results of transients in DC link of DC coupled photovoltaic system converter, DC-DC converter and lead-acid battery are shown.

**Ключевые слова:** системы хранения энергии, гибридные системы электроснабжения, двунаправленный DC-DC преобразователь, дискретная математическая модель.

**Key word:** energy storage systems, hybrid on-grid systems, bidirectional DC-DC converter, discrete mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий все большее внимание уделяется возобновляемым источникам энергии. Одним из самых распространенных видов возобновляемых источников является солнечная энергия. Наиболее перспективные для развития гибридные системы электроснабжения представляют из себя совокупность источников, устройств хранения и запаса энергии, преобразовательных устройств, питающей сети и локальной нагрузки [1]. В данной статье будет рассмотрена гибридная система с общей шиной постоянного тока (Рис. 1)

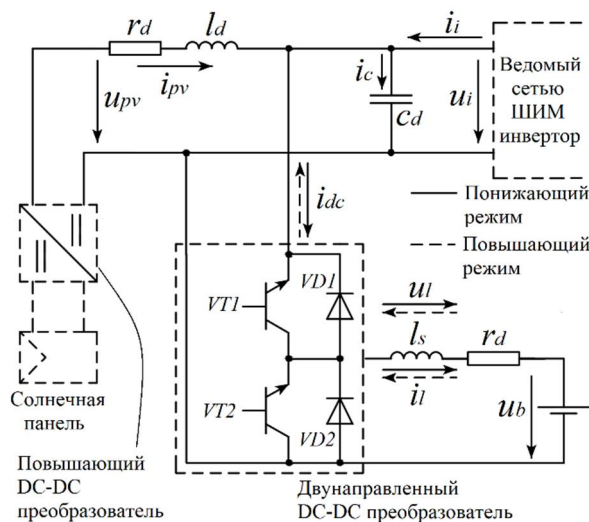


Рис. 1 Схема преобразователя фотогальванической системы с двунаправленным DC-DC преобразователем и аккумуляторной батареей

Особенностью такой системы является объединение источников и устройств запаса энергии посредством общей шины постоянного тока [2]. Для преобразования напряжения постоянного тока, которое вырабатывают солнечные панели, представленная система имеет в своем составе повышающий DC-DC преобразователь, управление которым основано на алгоритме поиска точки максимальной мощности солнечной панели. Такой алгоритм позволяет генерировать максимально возможную энергию солнечных панелей. В случае, когда вырабатываемая солнечной панелью мощность превышает мощность нагрузки, двунаправленный DC-DC преобразователь производит заряд аккумуляторной батареи, используемой в качестве резервного источника питания [3]. Система управления преобразователем должна соблюдать баланс мощностей и поддерживать постоянство напряжения в звене постоянного тока, а также производить заряд и разряд устройств хранения энергии [9].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для синтеза системы управления и анализа свойств двунаправленного DC-DC преобразователя, как объекта управления, следует провести анализ процессов в звене постоянного тока фотогальванической системы. Для этого необходимо разработать дискретную математическую модель двунаправленного DC-DC преобразователя. Модель должна учитывать автоматическое переключение силовых ключей в зависимости от режима работы преобразователя, а также режимы прерывистого и непрерывного токов. Основные режимы работы фотогальванической системы с учетом потерь в силовых ключах полупроводниковых преобразователей отображены на Рис.2.

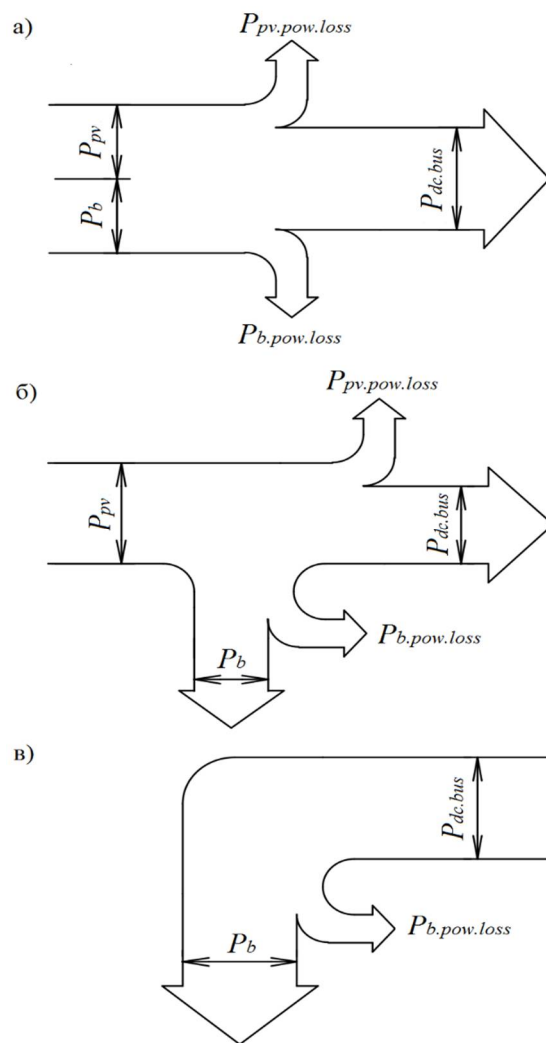


Рис. 2 Основные режимы работы фотогальванической системы  
 а) отдача энергии солнечной панели и аккумуляторной батареи в сеть  
 б) заряд аккумуляторной батареи и частичная отдача энергии солнечной панели в сеть  
 в) заряд аккумуляторной батареи от сети

Где  $P_b$  – мощность аккумуляторной батареи,  $P_{pv}$  – мощность, вырабатываемая солнечной панелью,  $P_{pv.pov.loss}$  – потери в повышающем преобразователе солнечной панели,  $P_{b.pov.loss}$  – потери в двунаправленном DC-DC преобразователе для аккумуляторной батареи,  $P_{dc.bus}$  – мощность в звене постоянного тока фотогальванической системы.

Согласно Рис. 2а, двунаправленный DC-DC преобразователь работает в повышающем режиме. Питание инвертора осуществляется за счет энергии солнечной панели и аккумуляторной батареи. В случае, когда вырабатываемая солнечной панелью мощность превышает мощность нагрузки, избыток используется для заряда аккумуляторной батареи (Рис 2б). В ночное время для поддержания работоспособности системы хранения энергии аккумуляторная батарея может быть заряжена от сети переменного тока с использованием инвертора (Рис. 2в).

Питание в звено постоянного тока фотогальванической системы (Рис. 1) поступает от солнечной панели через повышающий DC-DC преобразователь. К выходу звена постоянного тока подключен ведомый сетью инвертор. Преобразователь работает в понижающем режиме в случае заряда аккумуляторной батареи ( $i_{dc}>0$ ). При условии, когда вырабатываемой мощности солнечной панели не хватает для обеспечения питания нагрузки, двунаправленный DC-DC преобразователь работает в повышающем режиме ( $i_{dc}<0$ ). Параметры модели двунаправленного DC-DC преобразователя и аккумуляторной батареи представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры модели DC-DC преобразователя	
Параметры модели	Значение
Начальное значение напряжения $U_{i0}$ в звене постоянного тока, В	311
Начальное значение напряжения $U_b$ аккумуляторной батареи, В	52
Номинальная емкость аккумуляторной батареи $C_{10}$ , А/ч	60
Емкость конденсатора $C_d$ в звене постоянного тока, Ф	1500
Индуктивность $L_s$ в цепи DC-DC преобразователя, Гн	0.005
Активное сопротивление $R_l$ в цепи DC-DC преобразователя, Ом	0.3
Индуктивность $L_d$ в цепи преобразователя, Гн	0.01
Активное сопротивление $R_d$ в цепи преобразователя, Ом	0.3
Частота $f_{pwm}$ ШИМ DC-DC преобразователя, кГц	4000
Емкость конденсатора $c_p$ аккумуляторной батареи,	2000
Ток заряда $i_{10}$ , А	6

Ток заряда аккумуляторной батареи равен десятой части номинальной емкости аккумуляторной батареи,  $C_{10}/10$ .

Для моделирования процессов в звене постоянного тока фотогальванической системы приведем модель аккумуляторной батареи (Рис.3) и описывающую ее систему уравнений [5].

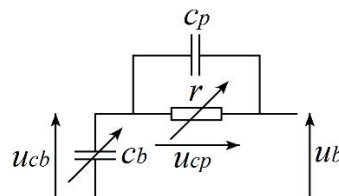


Рис. 3 Модель свинцово - кислотной аккумуляторной батареи

Где  $i_b$  – ток аккумуляторной батареи,  $u_b$  – напряжение батареи,  $n$  – количество последовательно соединенных батарей,  $u_{cb}$  – напряжение на конденсаторе  $c_b$ ,  $r$  – активное сопротивление батареи.

Математическое описание модели [5]:

$$\begin{cases} u_b(t) = n(u_{cb} + u_{cp}) \\ u_{cb} = \frac{i_b}{c_b}, \\ u_{cp} = \frac{1}{c_p} \left( i_b - \frac{u_{cp}}{r(t)} \right), \\ r(t) = \frac{1}{c_{10}} \left( \frac{6}{1+i_b^{0.6}} + \frac{0.48}{(1-SOC(t))^{1.2}} \right), \\ c_b(t) = \frac{1.67 \cdot c_{10}}{1 + 0.67 \cdot \left( \frac{i_b}{i_{10}} \right)^{0.9}} \cdot \frac{1}{0.16 \cdot n}. \end{cases} \quad (1)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

При разработке математической модели преобразователя и проведении модельного эксперимента учитывались следующие допущения:

- Солнечная панель, повышающий DC-DC преобразователь и инвертор представлены в качестве идеального источника постоянного тока.
- Модель не учитывает мертвое время и падение напряжения на силовых ключах двунаправленного DC-DC преобразователя.

Для дальнейшего исследования и построения математической модели двунаправленного DC-DC преобразователя необходимо составить систему уравнений, которая будет описывать процессы, происходящие в звене постоянного тока фотогальванической системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{pv} = \begin{cases} e_{pv}, & \text{если } f_1=1 \\ u_i, & \text{если } f_1=-1, \end{cases} \\ f_1 = \text{sign}(e_{pv} - u_i) \text{sg}(i_{pv}), \\ u_{pv} - u_i = r_{pv}(T_{pv}p + 1)i_{pv}, \\ i_c = i_d + i_i - i_{dc}, \\ u_i = u_c = \frac{c_d^{-1}}{T_b p} i_c - u_{i0}. \end{array} \right. \quad \mathfrak{I}_1 \quad (2)$$

Где  $u_{pv}$  и  $e_{pv}$  – напряжение и ЭДС солнечной панели и повышающего DC-DC преобразователя,  $u_c$  и  $u_i$  – напряжение в звене постоянного тока фотогальванической системы и на входе инвертора,  $i_c$  – ток конденсатора  $c_d$  в звене постоянного тока,  $i_i$  – ток инвертора,  $i_{pv}$  – ток солнечной панели и повышающего DC-DC преобразователя.  $\mathfrak{I}_1$  – функция, определяющая направление потоков энергии в звене постоянного тока фотогальванической системы.

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0 \\ -1, & \text{если } x < 0 \end{cases}$$

Запишем систему уравнений для описания процессов в двунаправленном DC-DC преобразователе с учетом повышающего и понижающего режимов [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta u = f_{k1}u_d - u_b, \\ \Delta u_1 = \begin{cases} -u_b, & \text{если } i_i > 0 \\ u_b - u_i, & \text{если } i_i < 0 \end{cases} \\ u_l = \begin{cases} \Delta u, & \text{если } f_2 = 1 \\ \Delta u_1, & \text{если } f_2 = -1, \end{cases} \\ f_2 = \text{sign}(i_l)\text{sign}(i_i), \\ u_l = r_l(T_l p + 1)i_l, \\ \Delta u = f_{k1}u_d - u_b, \\ u_b(t) = n(u_{cb} + u_{cp}) \\ i'_{dc} = \begin{cases} i_l, & \text{если } i_l > 0 \\ 0, & \text{если } i_l < 0, \end{cases} \\ i_{dc} = \begin{cases} f_{k1}i_l, & \text{если } f_2 = 1 \\ i'_{dc}, & \text{если } f_2 = -1. \end{cases} \end{array} \right. \quad \mathfrak{I}_2 \quad (3)$$

Где  $u_l$  и  $u_b$  – напряжение на индуктивности  $l_s$  and аккумуляторной батарее, соответственно.  $i_l$  – ток, протекающий через индуктивность  $l_s$ .  $i_{dc}$  – ток на входе двунаправленного DC-DC преобразователя.  $f_{k1}$  – функция переключения транзистора VT1.  $T_b$  – базисная постоянная времени,  $p$  – оператор Лапласа. Функция  $f_{k1}$  равна 1, когда транзистор VT1 находится в открытом состоянии, и равна 0 в обратном случае.  $\mathfrak{I}_2, \mathfrak{I}_3$  – функции, формирующие напряжение индуктивности  $u_l$  и тока  $i_{dc}$  двунаправленного DC-DC преобразователя в различных режимах работы.

Функция  $\mathfrak{I}_2$  используется для учета задержки при переключении режимов работы преобразователя и перехода прерывистого тока в непрерывный ток. Функция  $\mathfrak{I}_3$  учитывает особенности формирования тока двунаправленного DC-DC преобразователя во время процесса смены режимов работы (Рис. 4).

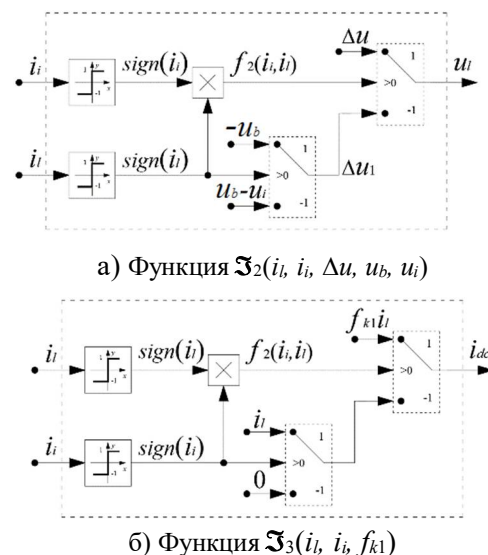


Рис. 4 Схема функций  $\mathfrak{I}_2, \mathfrak{I}_3$  модели двунаправленного DC-DC преобразователя

Согласно уравнениям (1), (2) и (3), составим структурную схему двунаправленного DC-DC преобразователя, учитывающую работу преобразователя в режимах прерывистого и непрерывного токов и задержку при переключениях между режимами работы преобразователя и фотогальванической системы. (Рис. 5).

Функции  $\mathfrak{I}_2$  и  $\mathfrak{I}_3$  представлены в модели двунаправленного DC-DC преобразователя согласно Рис. 4а и Рис. 4б соответственно. Структурная схема содержит нелинейные элементы и перекрестные связи.

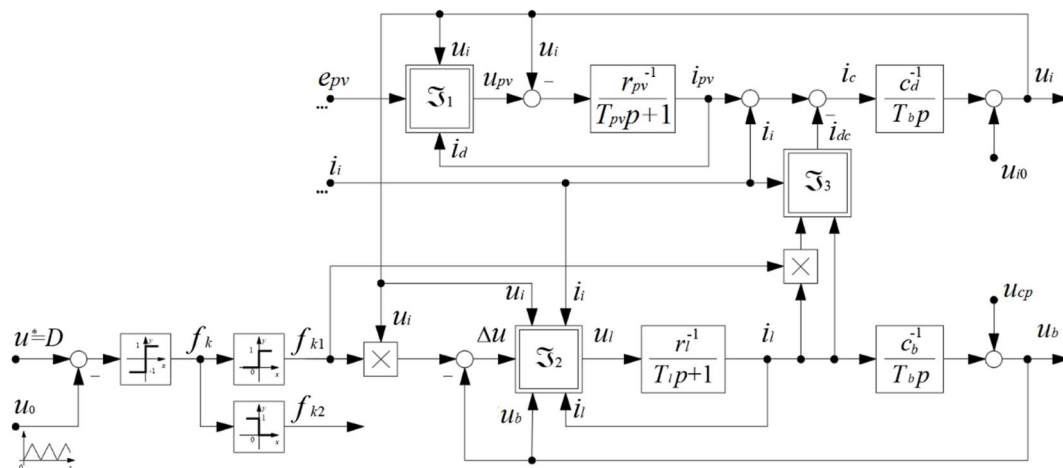
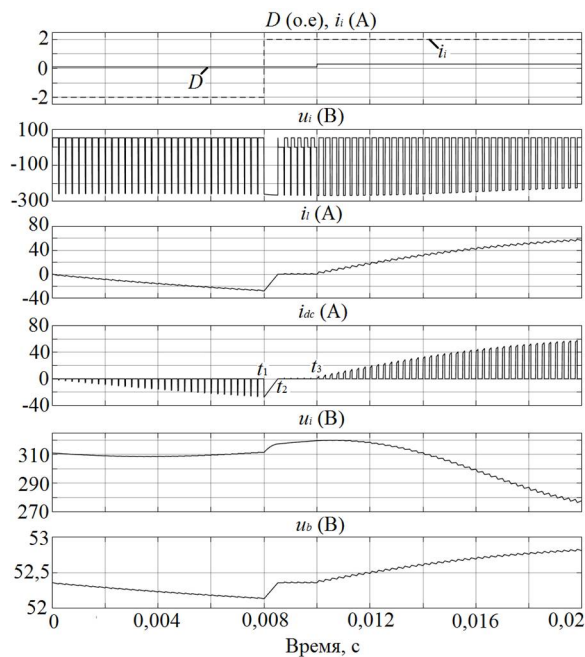


Рис. 5 Структурная схема двунаправленного DC-DC преобразователя

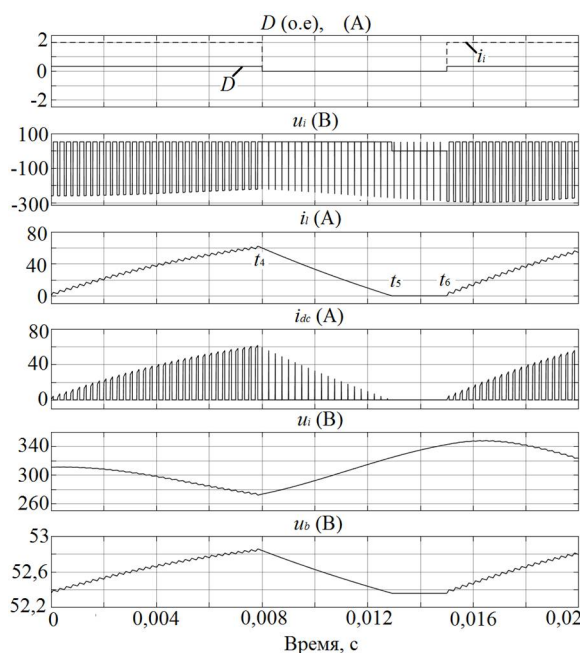
Управляющим воздействием на входе схемы является скважность  $D$ , с помощью которой регулируется напряжение и ток на выходе преобразователя. Ток инвертора  $i_i$  используется в модели в качестве возмущения для реализации изменения потоков энергии. Сигнал ЭДС  $e_{pv}$  отображает значение ЭДС солнечной панели на выходе повышающего DC-DC преобразователя. Выходами схемы являются напряжения аккумуляторной батареи  $u_b$  и инвертора  $u_i$ .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На Рис. 6 изображены переходные процессы, характеризующие смену режимов работы двунаправленного DC-DC преобразователя в разомкнутой системе, согласно изменению потоков энергии, изображенных на Рис. 2.



а) переключение между повышающим и понижающим режимами



б) смена источников заряда в понижающем режиме

Рис.6 Переходные процессы в двунаправленном DC-DC преобразователе.

В первом случае (Рис.6а) аккумуляторная батарея отдает энергию в звено постоянного тока. Это обуславливается нехваткой вырабатываемой солнечной панелью мощности для питания инвертора (Рис.1а). Двунаправленный DC-DC преобразователь работает в повышающем режиме. В момент времени  $t_1$  происходит смена режима: начинается заряд аккумуляторной батареи (Рис. 2б), согласно первой стадии заряда максимально допустимым током  $i_{i0}$  [7]. Преобразователь работает в понижающем режиме. Рис.6б иллюстрирует переход от режима заряда аккумуляторной батареи от солнечной панели (Рис. 2б) к заряду от питающей сети в ночное время (Рис. 2в). Двунаправленный DC-DC преобразователь при этом работает в понижающем режиме.

Из Рис.6а видно, что при автоматическом переключении режимов двунаправленного DC-DC преобразователя в момент времени  $t_1$  появляется задержка. Она зависит от значений индуктивности  $l_s$  и тока  $i_{dc}$ . С момента времени  $t_2$  по  $t_3$  преобразователь работает в режим прерывистого тока. Величина скважности  $D$  выбрана исходя из того, чтобы показать влияние задержки и прерывистых токов на работу DC-DC преобразователя. В частном случае режим прерывистых токов может возникать при колебаниях или падении напряжения в звене постоянного тока фотогальванической системы. Колебания напряжения зависят от режима работы солнечной панели, шага изменения скважности метода вычисления точки максимальной мощности солнечной панели и повышающего DC-DC преобразователя. Падение напряжения зависит от изменения локальной нагрузки и смены режима работы фотогальванической системы. Напряжения аккумуляторной батареи  $u_b$  и конденсатора  $u_c$  изменяются пропорционально току  $i_{dc}$ . При изменении величины скважности  $D$  в момент времени  $t_3$  преобразователь переходит в режим непрерывного тока.

На Рис.6б в момент времени  $t_4$  отключается солнечная панель и появляется задержка двунаправленного DC-DC преобразователя, продолжающаяся до времени  $t_5$ . С началом зарядки от общепромышленной сети в момент времени  $t_6$ , начинается повышение напряжения  $u_b$  на аккумуляторе и разряд конденсатора  $c_s$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью модели двунаправленного DC-DC преобразователя были проанализированы режимы работы фотогальванической системы. Исследование показало, что при смене режимов работы и потоков энергии возникает режим неполной управляемости двунаправленного DC-DC преобразователя. Описанная задержка и режим прерывистых токов двунаправленного DC-DC преобразователя должны учитываться при разработке системы управления преобразовательным устройством для фотогальванических систем. Для учета явлений прерывистых токов в модели преобразователя были использованы функции  $\mathfrak{Z}_2$  и  $\mathfrak{Z}_3$ .

Разработанная математическая модель двунаправленного DC-DC преобразователя позволяет учитывать:

- Смену направлений энергии в звене постоянного тока при переключении режимов работы фотогальванической системы.
- Задержку, появляющуюся при переходе из повышающего режима работы DC-DC преобразователя в понижающий и обратно.

- Режимы прерывистого и непрерывного токов DC-DC преобразователя.

Модель может быть использована для разработки системы управления преобразователей фотогальванических систем и исследования переходных процессов как в замкнутых, так и разомкнутых фотогальванических системах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications / M. Nehrir, C. Wang, K. Strunz // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2011. — Т. 2, № 4. — С. 392—403.
2. Zhang N., Sutanto D., Muttaqi K. M. A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — Т. 56. — С. 388-401.
3. Qian Z., Abdel-Rahman O., Al-Atrash H Modeling and control of three-port DC/DC converter interface for satellite applications // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2010. — Т. 25. — №. 3. — С. 637-649.
4. Fakhm H., Lu D., Francois B. Power control design of a battery charger in a hybrid active PV generator for load-following applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2011. — Т. 58. — №. 1. — С. 85-90.
5. Wu T., Xiao Q., Wu L. Study and implementation on batteries charging method of Micro-Grid photovoltaic systems // Smart Grid and Renewable Energy. — 2011. — Т. 2. — №. 04. — С. 324 – 330.
6. Wu H., Sechilariu M., Locment F Influence of Dynamic Efficiency in the DC Microgrid Power Balance // Energies. — 2017. — Т. 10. — №. 10. — С. 1563 – 1570.
7. Li F. et al. A modified MPPT algorithm with integrated active power control for PV-battery systems // Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016 IEEE International Conference on. — 2016. — С. 742-746.
8. Braslavsky I., Plotnikov I., Valtchev S. The mathematical modeling of alternating current electric drive with DC-DC converter and ultracapacitors // Proceedings - 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC. — 2016. — С. 511-515.
9. Sun K. et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage //IEEE Transactions on Power Electronics. — 2011. — Т. 26. — №. 10. — С. 3032-3045.
10. Rawat R., Chandel S. S. Review of maximum power point tracking techniques for solar photovoltaic systems // Energy Technology. — 2013. — Т. 1. — №. 8. — С. 438-448.