

УДК 621.31

А.В. Осипов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная

## Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразователями постоянного напряжения

Проведены исследования энергетической эффективности применения преобразователей постоянного напряжения при реализации режима экстремального регулирования мощности солнечной батареи. Получена математическая модель, позволяющая определить регулировочные и энергетические характеристики преобразователей при работе от солнечной батареи на нагрузку в виде аккумулятора.

**Ключевые слова:** преобразователь энергии солнечной батареи, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, энергетическая эффективность, экстремальное регулирование мощности.

Одним из основных способов повышения энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок является реализация режима отбора максимума мощности в оптимальной рабочей точке вольт-амперной характеристики солнечной батареи, т.е. реализация режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей [1]. Эту функцию выполняют преобразователи энергии солнечных батарей (ПЭСБ), по иностранной терминологии контроллеры заряда аккумуляторных батарей с реализацией функции МРРТ (Maximum Power Point Tracker).

Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании и создании ПЭСБ, является согласование уровней напряжения источников энергии в единой энергетической системе. Учитывая, что напряжение рабочей точки вольт-ваттной характеристики (ВВХ) соответствующей максимальной мощности нестабильно (изменяется в зависимости от освещенности и температуры фотоэлектрических панелей), ПЭСБ должен быть регулируемым. Необходимость обеспечения широкого диапазона регулирования напряжения СБ при поиске точки экстремума мощности существенным образом отражается на структуре построения ПЭСБ и затрудняет определение его энергетических характеристик, а также расчет оптимальных параметров элементов силовой схемы.

Как правило, ПЭСБ строятся на основе бестрансформаторных преобразователей постоянного напряжения, обеспечивающих высокий КПД за счет минимума силовых элементов, при этом массогабаритные показатели фильтра минимизируются высокими частотами преобразования. Однако схемы этого класса имеют ограниченный диапазон регулирования, что усложняет согласование уровней напряжения используемых источников энергии, в данном случае солнечной и аккумуляторной батарей (СБ и АБ). Согласование, как правило, достигается путем последовательного или параллельного соединения элементарных источников составляющих АБ или СБ, что позволяет настроить уровни напряжения источников таким образом, чтобы диапазон регулирования ПЭСБ охватывал точку максимальной мощности ВВХ с учетом ее возможного дрейфа. При этом не всегда удается достичь приемлемых энергетических характеристик системы, например, в случае применения преобразователя понижающего типа для того, чтобы охватить диапазоном регулирования точку максимальной мощности ВВХ часто приходится существенно уменьшать напряжение АБ или увеличивать напряжение СБ, что приводит к завышению габаритной мощности элементов ПЭСБ. Целью настоящей работы является анализ энергетической эффективности преобразователей энергии солнечной батареи на основе известных схем преобразователей постоянного напряжения по критериям коэффициента использования солнечной батареи  $K_p$  и коэффициента полезного действия преобразователя  $\eta$ .

Распространенным вариантом ПЭСБ на основе преобразователей постоянного напряжения является простейший понижающий преобразователь, представленный на рис. 1, а. Несомненным преимуществом схемы является стабильный ток заряда аккумулятора, обеспечиваемый большой выходной индуктивностью, однако прерывистое импульсное потребление входного тока требует установки громоздкого С-фильтра. Регулировочная характеристика такого преобразователя при условии непрерывности тока дросселя описывается соотношением

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{\gamma}{1 + R_{L1}/R_H}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – относительная длительность открытого состояния транзистора;  $R_{L1}$  – активное сопротивление дросселя  $L_1$ ;  $R_H$  – сопротивление нагрузки.

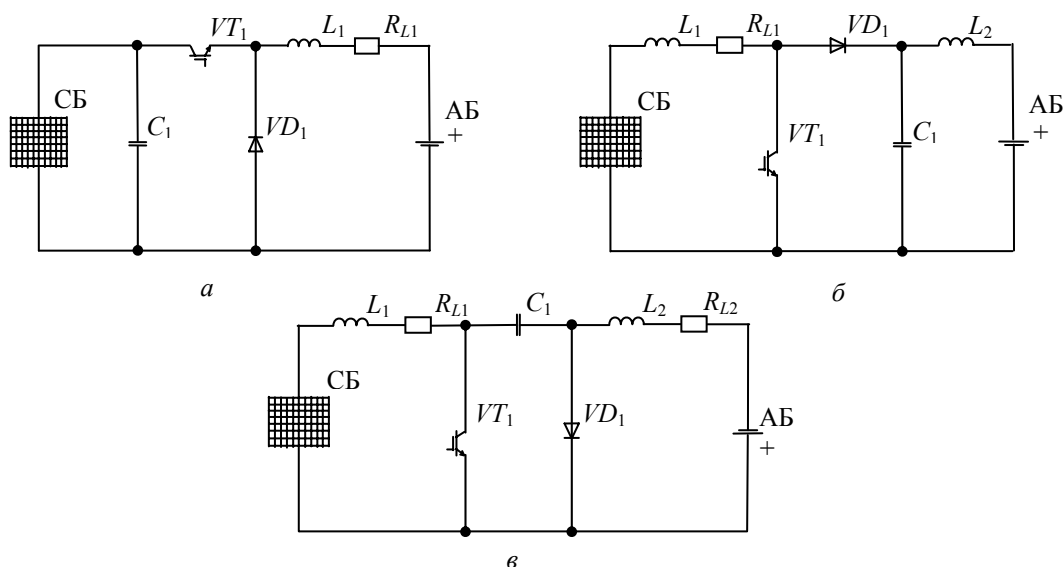


Рис. 1. Регулируемые преобразователи энергии солнечной батареи: а – понижающий преобразователь; б – повышающий преобразователь; в – преобразователь Кука

Следует заметить, что регулировочная характеристика (1) соответствует работе преобразователя от источника ЭДС. При питании преобразователя от солнечной батареи, имеющей нелинейную ВАХ и работе на АБ, которая является нагрузкой с непостоянным сопротивлением, характеристики существенно изменятся. Используя характеристику (1) и учитывая, что регулируемым параметром является входное напряжение, т.е. напряжение СБ, получим выражение

$$U_{СБ}^* = \frac{U_{СБ}}{U_{АБ}} = \frac{1 + R_{L1}/R_H}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot I_{ВЫХ}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot \frac{I_{ВХ}}{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot \frac{I_{СБ}}{\gamma^2}.$$

В связи с существенной сложностью выражений, описывающих ВАХ реальной СБ, воспользуемся достаточно простой математической моделью СБ предложенной в [2], где ВАХ задана тремя характерными точками: напряжением холостого хода  $U_{ХХ}$ , током короткого замыкания  $I_{КЗ}$ , оптимальными значениями тока  $I_0$  и напряжения  $U_0$

$$I_{СБ} = I_{КЗ} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{I_0}{I_{КЗ}} \right) \frac{U_{ХХ} - U_{СБ}}{U_{ХХ} - U_0} \right], \quad (2)$$

используя которое получим квадратное уравнение

$$U_{СБ}^* = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{\gamma^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{I_0}{I_{КЗ}} \right) \frac{U_{ХХ} - U_{СБ}}{U_{ХХ} - U_0} \right], \quad (3)$$

связывающее регулируемый параметр  $U_{СБ}$  с относительной длительностью импульса управления  $\gamma$ . Сопротивление потерь в дросселе удобно выразить относительной величиной  $R_{L1}^* = R_{L1} \cdot I_{КЗ} / U_{АБ}$ .

Важным параметром, характеризующим энергетическую эффективность ПЭСБ, является коэффициент использования СБ  $K_p$ , определяемый соотношением фактически потребляемой мощностью от СБ и мощностью оптимальной точки ее ВАХ

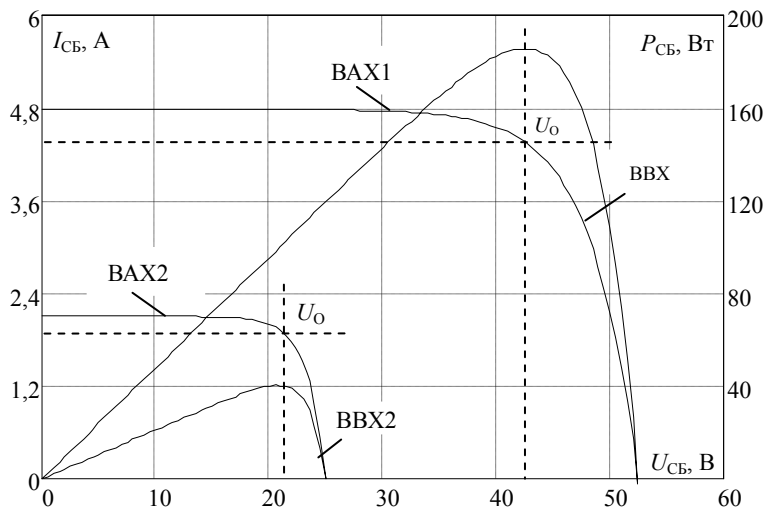
$$K_p = \frac{P_{СБ}}{P_{СБ\_max}} = \frac{U_{СБ}}{U_0^*} \cdot \frac{I_{СБ}}{I_0}.$$

Другой рассматриваемый критерий энергетической эффективности – коэффициент полезного действия преобразователя  $\eta$ , который при пренебрежении потерями в транзисторе  $VT_1$ , т.е. при учете только потерь в дросселе  $L_1$  можно получить по выражению

$$\eta = \frac{1}{U_{CB}^*} \cdot \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{1}{U_{CB}^*} \cdot \frac{1}{\gamma}.$$

Таким образом, задавая ВАХ СБ с помощью выражения (2), можно определить зависимости энергетических параметров преобразователя от управляющего воздействия  $\gamma$ .

Целесообразным является определение энергетических характеристик ПЭСБ в крайних точках его диапазона регулирования, т.е. при ВАХ соответствующих крайним значениям напряжения  $U_0$ . В результате проведенных исследований установлено, что для панели КСМ-160 максимальное значение напряжения оптимальной точки соответствует солнечной погоде и температуре  $-30^\circ\text{C}$ , при этом ВАХ1 имеет параметры  $U_{XX} = 52,46\text{ В}$ ,  $I_{K3} = 4,78\text{ А}$ ,  $U_0 = 43,1\text{ В}$ ,  $I_0 = 4,3\text{ А}$ . Минимальное значение



напряжения оптимальной точки соответствует слабой освещенности панелей при температуре от  $+60$  до  $+70^\circ\text{C}$ . ВАХ2 в этом случае имеет параметры  $U_{XX} = 25,2\text{ В}$ ;  $I_{K3} = 2,1\text{ А}$ ;  $U_0 = 21,8\text{ В}$ ;  $I_0 = 1,8\text{ А}$ . Графически характеристики СБ в обоих случаях представлены на рис. 2.

Рис. 2. Характеристики фотоэлектрических панелей КСМ-160

Путем решения уравнения (3) в системе MathCad получены характеристики понижающего преобразователя (рис. 1а) при работе на ВАХ1 и ВАХ2 при напряжении аккумулятора  $U_{AB} = 24\text{ В}$  и относительных потерях в дросселе  $R_{L1}^* = 0,05$ . Видно, что при температуре  $-30^\circ\text{C}$ , входная мощность преобразователя имеет максимум при  $\gamma = 0,59$ , что соответствует близкому к единице коэффициенту использования  $K_P \rightarrow 1$ . Коэффициент полезного действия  $\eta$  в этой точке имеет минимум составляет  $0,93\%$ . Следует отметить, что во всем диапазоне регулирования  $\gamma$  напряжение СБ превышает напряжение АБ, т.е.  $U_{CB}^* > 1$ . Увеличение напряжения СБ ограничено напряжением  $U_{XX}$  СБ, которое достигается при  $\gamma = 0,46$ , при дальнейшем уменьшении  $\gamma$  и наложении условия непрерывности тока дросселя ток нагрузки отсутствует  $I_{ВЫХ} = 0$ , что обуславливает  $K_{PD} \rightarrow 1$ . Однако, ввиду конечности индуктивности дросселя преобразователь переходит в режим прерывистого тока и его параметры не могут описываться характеристикой (3).

Уменьшение напряжения оптимальной точки ВАХ до значения  $U_0 = 21,8\text{ В}$  при  $U_{AB} = 24\text{ В}$  не позволяет эффективно применять преобразователь понижающего типа, о чем свидетельствуют характеристики, представленные на рис. 3, б. Видно, что диапазон регулирования преобразователя в этом случае очень узкий и заключен в интервале  $24\text{--}25\text{ В}$ , и самое главное не охватывает точку ВАХ с максимальной мощностью. Коэффициент использования в этом случае  $K_P = 0,33$  при  $\gamma = 1$ . Результаты говорят об эффективности применения в этом случае повышающего преобразователя, позволяющего получить напряжение СБ меньше напряжения АБ  $U_{CB} < U_{AB}$ .

Повышающий преобразователь (рис. 1, б) имеет на входе дроссель  $L_1$ , обеспечивающий непрерывность входного тока и стабильность рабочей точки ВАХ по току. Однако учитывая импульсный режим заряда конденсатора  $C_1$ , необходима установка небольшого выходного дросселя  $L_2$ , обеспечивающего заряд АБ постоянным током. Регулировочная характеристика повышающего преобразователя при работе от идеального источника напряжения при условии непрерывности тока дросселя  $L_1$  описывается широко известным соотношением

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{1-\gamma}{(1-\gamma)^2 + R_{L1}/R_H}. \quad (4)$$

Характеристика идеального преобразователя показывает увеличение напряжения на всем диапазоне регулирования, однако наличие потерь во входном дросселе приводит к ее искажению при больших значениях  $\gamma$ , что связано с резким ростом входного тока по отношению к выходному [3]. Для определения регулировочной характеристики, соответствующей режиму работы от СБ на нагрузку в виде АБ, произведены преобразования аналогичные проведенным для понижающего преобразователя и получено выражение

$$U_{СБ}^* = R_{L1}^* \left( 1 - \left( 1 - \frac{I_0}{I_{КЗ}} \right) \frac{U_{XX} - U_{СБ}}{U_{XX} - U_0} \right) + (1 - \gamma). \quad (5)$$

Характеристики повышающего преобразователя, полученные по формуле (5) при тех же параметрах представлены графически на рис. 3. Результаты показывают, что преобразователь повышающего типа имеет линейную регулировочную характеристику, при этом обусловленная потерями входного дросселя нелинейность, свойственная уравнению (4) в уравнении (5) отсутствует, что объясняется тем, что ВАХ СБ в этом случае находится на ветви стабилизации тока. Практическим выводом является невозможность этой схемы настроиться на точку ВАХ СБ с максимальной мощностью при  $U_0 > U_{АБ}$ , в результате чего, коэффициент использования СБ составляет  $K_p = 0,65$  и соответствует  $\gamma = 0$ , т.е. полностью закрытому транзистору. Однако эффективной областью применения этой схемы является работа при слабой освещенности панелей, что подтверждается результатами решения уравнения (5) для ВАХ2 с  $U_{02} = 21,8$  В, при которой соблюдается условие  $U_0 < U_{АБ}$ .

Добиться успешного регулирования точки ВАХ с максимальной мощностью при любом соотношении напряжений  $U_{АБ}$  и  $U_0$  можно с помощью составного широкодиапазонного преобразователя, например, преобразователя Кука, имеющего входной каскад на основе повышающего, а выходной на основе понижающего преобразователя (рис. 1, в). Регулировочная характеристика преобразователя Кука описывается соотношением [3]

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \cdot \frac{1}{R_{L1}/R_H \cdot \left( \frac{\gamma}{1 - \gamma} \right)^2 + R_{L2}/R_H + 1}$$

при этом для соотношения токов выполняется условие

$$\frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{1 - \gamma}{\gamma}$$

Получить характеристики преобразователя Кука при работе от СБ на АБ можно решая уравнение относительно переменной  $\gamma$ , при подстановке  $\Psi = \frac{1 - \gamma}{\gamma}$  уравнение примет вид

$$U_{СБ}^* = \Psi^2 \frac{R_{L2}}{U_{АБ}} I_{СБ} + \Psi + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} I_{СБ}$$

и имеет один положительный корень

$$\Psi = \frac{\sqrt{U_{АБ}^2 + 4R_{L2}I_{СБ}(U_{СБ} - R_{L1}I_{СБ}) - U_{АБ}}}{2R_{L2}I_{СБ}},$$

который с учетом (2) позволяет получить искомую аналитическую связь.

Результаты решения уравнения представлены на рис. 3, видно, что преобразователь Кука позволяет регулировать напряжение СБ в точках близких к максимальной мощности, т.е. получить  $K_p \rightarrow 1$  как в случае  $U_0 > U_{АБ}$  при  $\gamma = 0,38$  с КПД равным  $\eta = 0,91$ , так и при  $U_0 < U_{АБ}$  при  $\gamma = 0,58$  и  $\eta = 0,92$ . Таким образом, при прочих равных условиях преобразователь Кука является единственным бестрансформаторным преобразователем позволяющим получить близкий к единице коэффициент использования СБ при любом соотношении напряжений  $U_0$  и  $U_{АБ}$ . Однако следует учитывать, что преобразователь Кука, являясь составным преобразователем, производит двойное преобразование энергии и соответственно имеет завышенную по отношению к рассмотренным схемам габаритную мощность силовых элементов. Это проявляется при выборе транзистора, коммутирующего суммарный ток АБ и СБ, а также в наличии в схеме сразу двух дросселей  $L_1$  и  $L_2$ . Ухудшение КПД

преобразователя, связанное с введением дополнительного дросселя можно наблюдать по данным табл. 1 и рис. 3.

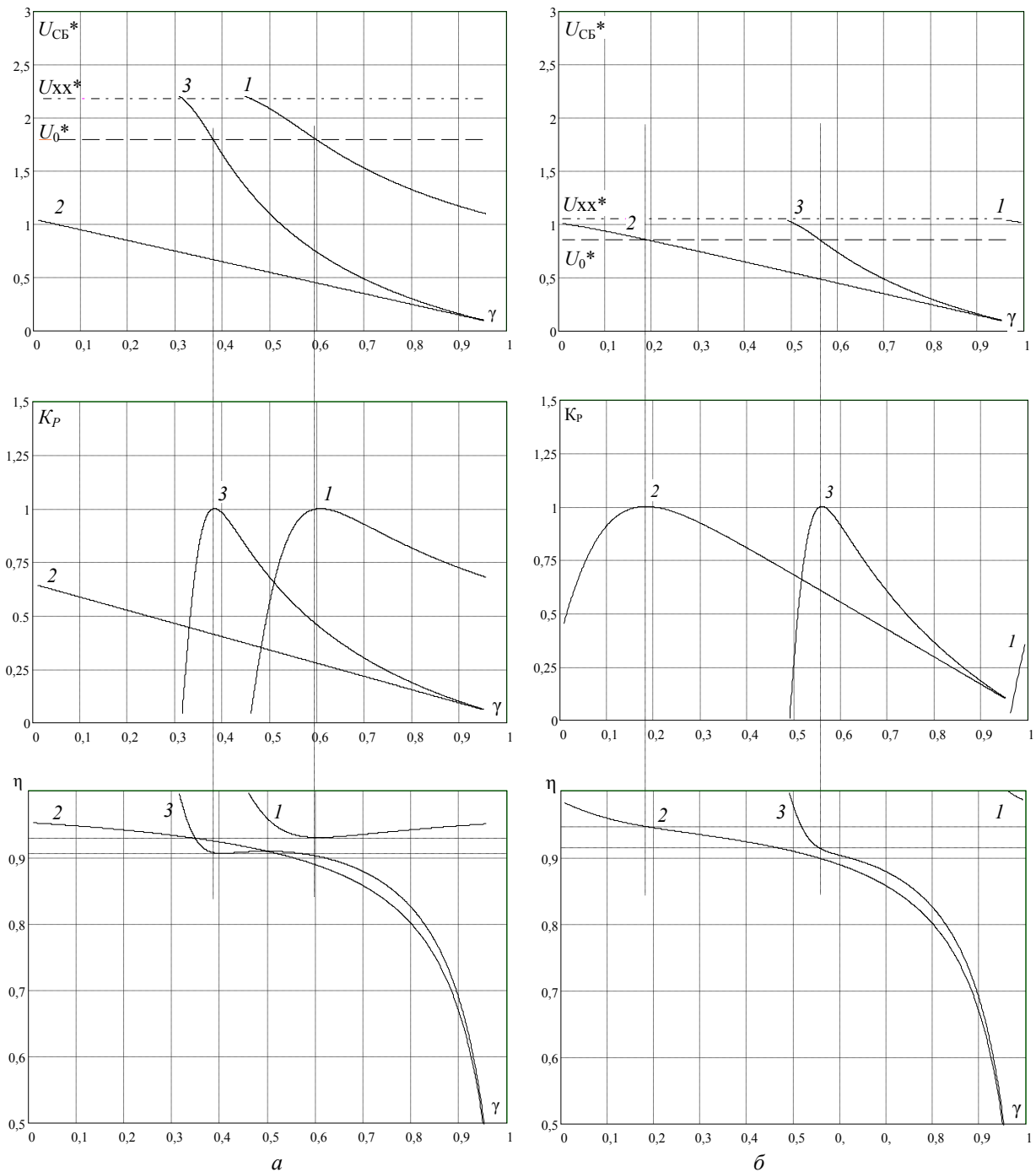


Рис. 3. Характеристики преобразователя энергии солнечной батареи на основе понижающего преобразователя (1), повышающего (2), преобразователя Кука (3) при  $U_{AB} = 24\text{В}$ ,  $R_{L1}^* = 0,05$  и параметрах:  $a - \text{VAX1 } U_0 > U_{AB}$ ;  $b - \text{VAX2 } U_0 < U_{AB}$

Для упрощения сравнительного анализа данные расчетов сведены в таблицу.

#### Сравнительный анализ схем преобразователей постоянного напряжения

Схема преобразователя	VAX1 $U_0 > U_{AB}$		VAX2 $U_0 < U_{AB}$	
	КПД, $\eta$	$K_p$	КПД, $\eta$	$K_p$
Понижающий преобразователь	0,93	1	0,98	0,33
Повышающий преобразователь	0,95	0,65	0,95	1
Преобразователь Кука	0,91	1	0,92	1

Характеристики построенные на основе полученной математической модели позволили произвести количественную оценку энергетических показателей преобразователей постоянного напря-

жения (таблица) сопоставительный анализ которых показывает, что преобразователь Кука за счет широкого диапазона регулирования имеет гораздо лучший  $K_p$ , фактически при любых условиях работы ( $K_p \rightarrow 1$ ). Худшие значения КПД объясняются наличием в схеме сразу двух дросселей. При этом анализ современного состояния рынка показывает, что стоимость СБ в пересчете на единицу мощности существенно превышает стоимость силовых элементов преобразователя, это заставляет при выборе схемы отдавать предпочтение коэффициенту использования солнечной батареи  $K_p$  относительно габаритной мощности элементов силовой схемы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения 14.В37.21.0420 и 14.В37.21.1493.

#### *Литература*

1. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 2. – С. 102–107.
2. Привалов В.Д. Оценка эффективности применения экстремального регулятора в автономных СЭП / В.Д. Привалов, В.Е. Никифоров. – Куйбышев: КПИ, 1981. – 16 с.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

---

#### **Осипов Александр Владимирович**

Канд. техн. наук, зав. лабораторией НИИ автоматики и электромеханики ТУСУРа

Тел.: +7-8-903-914-09-67

Эл. почта: ossan@mail.ru

#### **Шурыгин Юрий Алексеевич**

Д-р. техн. наук, профессор, ректор ТУСУРа

Тел.: +7(382-2) 510-530

Эл. почта: office@tusur.ru

#### **Шиняков Юрий Александрович**

Д-р. техн. наук, директор НИИ космических технологий (КТ) ТУСУРа

Тел.: + 7(382-2) 90-01-62

Эл. почта: shua@main.tusur.ru

#### **Отто Артур Исаакович**

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании, мл. научн. сотрудник НИИ КТ ТУСУРа

Тел.: +7-923-415-92-32

Эл. почта: ottoai@mail.ru

#### **Черная Мария Михайловна**

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании, мл. научн. сотрудник НИИ КТ ТУСУРа

Тел.: +7-905-992-89-70

Эл. почта: cmm91@inbox.ru

Osipov A.V., Shurygin Yu.A., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M.

#### **The comparative analysis of the energy conversion efficiency of solar energy by DC converters**

The article describes the research of the energy efficiency of DC converters for the extreme control of solar power. A mathematical model allows to determine the adjusting and energy characteristics of the converter when using the solar battery on the load in the form the battery.

**Keywords:** solar energy converter, solar battery, accumulator battery, energy efficiency, extreme power control.