

УДК 621.311

А.С. Романенко, А.В. Кобзев, В.Д. Семенов

Энергобаланс в автономной системе электроснабжения с регулятором мощности на основе матричного преобразователя тока солнечной батареи

Представлено выражение энергобаланса системы электроснабжения с регулятором мощности на основе матричного преобразователя тока солнечной батареи, которое позволяет рассчитать площадь солнечной батареи, необходимой для выполнения условия энергобаланса при заданных циклограммах освещённости и мощности нагрузки. Найденная таким образом площадь солнечной батареи позволяет рассчитать коэффициент энергетической эффективности системы электроснабжения и сравнить его с системами электроснабжения на базе других структур.

Ключевые слова: система электроснабжения, выражение энергобаланса, матричный преобразователь.

Матричный преобразователь [1] состоит из нескольких элементарных ячеек, которые параллельно или последовательно коммутируются друг с другом и осуществляют регулирование выходного напряжения или тока. Такое построение преобразователя повышает его надёжность, а кроме того, при построении СЭС позволяет с наилучшими массогабаритными показателями аппаратуры регулирования и контроля системы электроснабжения (АРКСЭС) использовать две и более аккумуляторные батареи (АБ) [2, 3]. Упрощённая структура СЭС на базе матричного преобразователя тока (рис. 1) содержит СБ, разделённую на несколько секций (СБ1...СБz), ключи матричного преобразователя тока (К1.1 ... Кz.2), систему управления данными ключами (СУ), аккумуляторные батареи (АБ1, АБ2), выходные диоды (VD1, VD2) и выходные ключи (Кв1, Кв2).

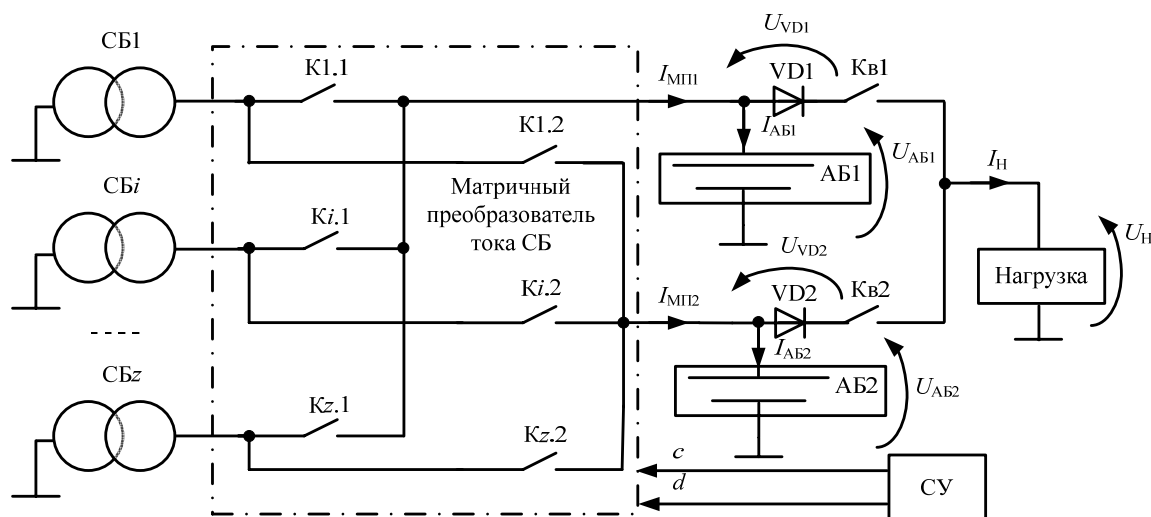


Рис. 1. Структура СЭС на базе матричного преобразователя тока СБ

Ток нагрузки I_H формируется цепями АБ1 или АБ2 в зависимости от состояния выходных ключей Кв1, Кв2 и напряжения на каждой из двух АБ (U_{AB1} , U_{AB2}). В свою очередь токи в цепях АБ определяются выходными токами $I_{МП1}$, $I_{МП2}$ матричного преобразователя, которые по сути являются суммарными токами параллельно подключенных секций СБ. Если ток на выходе матричного преобразователя превышает ток нагрузки, происходит заряд АБ, её напряжение возрастает, при обратной ситуации происходит разряд АБ, её напряжение снижается. Таким образом, в СЭС на базе матричного преобразователя ток и напряжение на нагрузке определяются следующими выражениями:

$$I_H = \begin{cases} \sum_{k=1}^c I_{CBk} \pm I_{AB1}, & \text{при } U_{AB1} - U_{VD1} > U_{AB2}, \\ \sum_{k=1}^d I_{CBk} \pm I_{AB2}, & \text{при } U_{AB2} - U_{VD2} > U_{AB1}; \end{cases} \quad (1)$$

$$U_H = \begin{cases} U_{AB1} - U_{VD1}, & \text{при } U_{AB1} - U_{VD1} > U_{AB2}, \\ U_{AB2} - U_{VD2}, & \text{при } U_{AB2} - U_{VD2} > U_{AB1}; \end{cases} \quad (2)$$

где c – количество подключенных секций СБ в цепь АБ1; d – количество подключенных секций СБ в цепь АБ2.

Для оценки энергетической эффективности автономной системы электроснабжения используется энергобалансный подход [4, 5], применённый для СЭС с параллельной, параллельно-последовательной и последовательной структурами. Однако эти выражения напрямую не применимы к структуре СЭС с регулятором мощности на базе матричного преобразователя тока СБ, поэтому получение соответствующего выражения энергобаланса является актуальной задачей.

Энергобаланс СЭС, как известно из литературы [4], выполняется за период T работы СЭС, если энергия разряда АБ W_{PAB} равна нулю. Данное условие соблюдается, если энергия разряда W_{PAB} за период T равна энергии заряда АБ W_{3AB} . Таким образом, условие энергобаланса можно записать следующим образом:

$$W_{PAB} = W_{3AB}. \quad (3)$$

СЭС на базе матричного преобразователя можно представить в виде схем распределения мощности СБ при её дефиците (интервалы времени $\Delta\tau_{py}$) и избытке (интервалы времени $\Delta\tau_{3y}$), показанных на рис. 2 и 3.

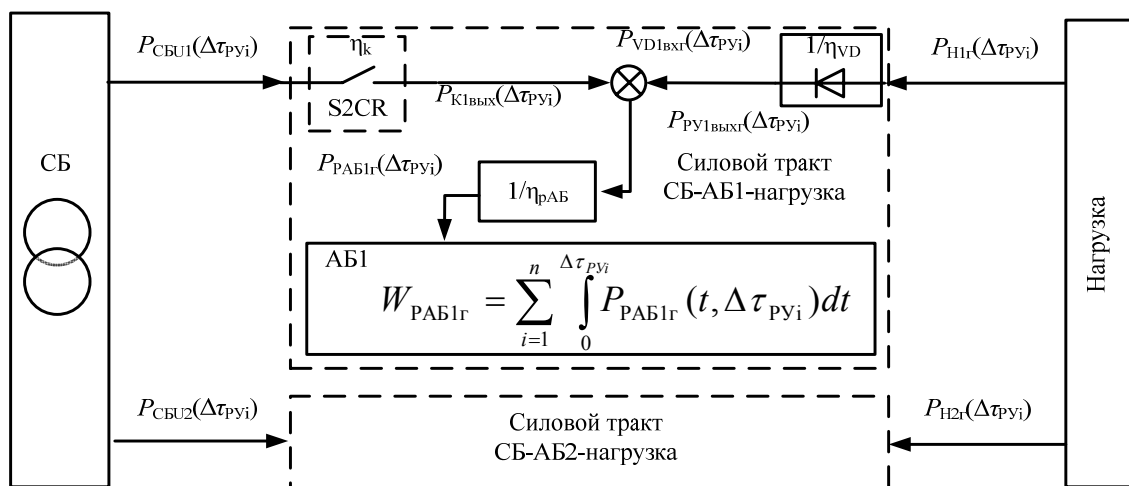


Рис. 2. Схема распределения мощности СБ при её дефиците

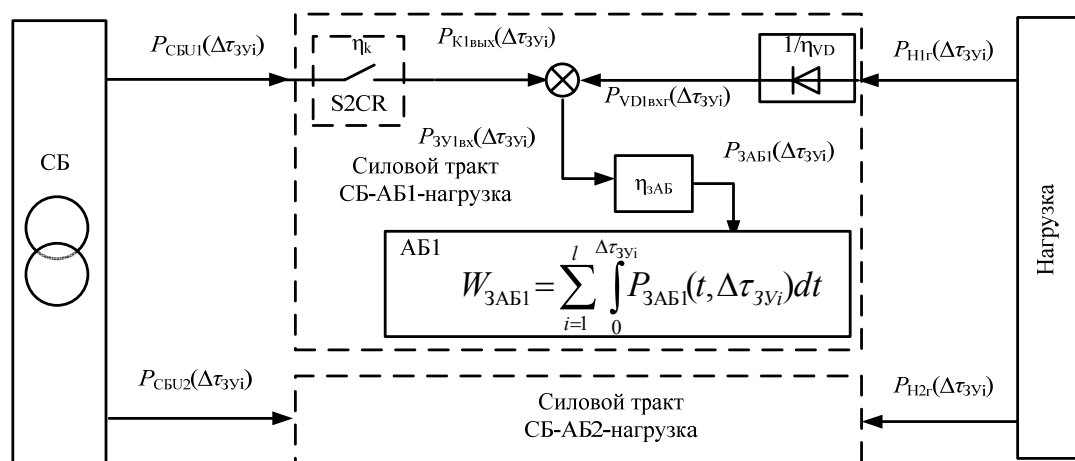


Рис. 3. Схема распределения мощности СБ при её избытке

В данных схемах силовые элементы АРКСЭС представлены звеньями передачи мощности с коэффициентами полезного действия: ключи матричного преобразователя звеном η_k ; выходные диоды звеном η_{VD} . Звено передачи мощности выходных ключей Кв1, Кв2 не представлено в схемах, так как потери мощности незначительны. Мощность нагрузки известна при проектировании СЭС, поэтому в схемах распределения направлена встречно её физическому потоку и обозначена как генерируемая (с индексом «г»). Математически генерируемая мощность равна физической мощности с противоположным знаком. В схемах распределения потери мощности в АБ при её заряде представлены звеном $\eta_{з\text{ АБ}}$, а потери мощности при разряде – звеном $\eta_{р\text{ АБ}}$.

Так как тракты распределения мощности СБ через АБ1 и АБ2 по составу силовых устройств идентичны друг другу, согласно схеме распределения при дефиците мощности СБ выражение $P_{р\text{ АБ1}}(\Delta\tau_{pyi})$ разрядной мощности АБ1 имеет следующий вид:

$$P_{р\text{ АБ1}}(\Delta\tau_{pyi}) = -P_{р\text{ АБ1г}}(\Delta\tau_{pyi}) = \frac{P_{СБУ1}(\Delta\tau_{pyi})\eta_k + P_{H1г}(\Delta\tau_{pyi})/\eta_{VD}}{\eta_{р\text{ АБ}}} = \frac{P_{H1}(\Delta\tau_{pyi})/\eta_{VD} - P_{СБУ1}(\Delta\tau_{pyi})\eta_k}{\eta_{р\text{ АБ}}}, \quad (4)$$

где $P_{H1}(\Delta\tau_{py})$ – мощность, потребляемая нагрузкой из цепи АБ1; $P_{СБУ1}(\Delta\tau_{py})$ – мощность, отдаваемая СБ в цепь АБ1.

Чтобы получить выражение разрядной энергии АБ1 на интервалах времени $\Delta\tau_{pyi}$, необходимо проинтегрировать выражение (4):

$$W_{р\text{ АБ1}} = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{pyi}} \frac{P_{H1}(t, \Delta\tau_{pyi})/\eta_{VD} - P_{СБУ1}(t, \Delta\tau_{pyi})\eta_k}{\eta_{р\text{ АБ}}} dt. \quad (5)$$

Согласно схеме распределения при избытке мощности СБ выражение $P_{з\text{ АБ1}}(\Delta\tau_{zy})$ зарядной мощности АБ1 имеет следующий вид:

$$P_{з\text{ АБ1}}(\Delta\tau_{zyi}) = (P_{СБУ1}(\Delta\tau_{zyi})\eta_k + \frac{P_{H1г}(\Delta\tau_{zyi})}{\eta_{VD}})\eta_{з\text{ АБ}} = (P_{СБУ1}(\Delta\tau_{zyi})\eta_k - \frac{P_{H1}(\Delta\tau_{zyi})}{\eta_{VD}})\eta_{з\text{ АБ}}. \quad (6)$$

Чтобы получить выражение зарядной энергии АБ1 на интервалах времени $\Delta\tau_{zyi}$, необходимо проинтегрировать выражение (6):

$$W_{з\text{ АБ1}} = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{zyi}} \eta_{з\text{ АБ}} (P_{СБУ1}(t, \Delta\tau_{zyi})\eta_k - \frac{P_{H1}(t, \Delta\tau_{zyi})}{\eta_{VD}}) dt. \quad (7)$$

Аналогично составляются выражения для $W_{р\text{ АБ2}}$ и $W_{з\text{ АБ2}}$. Учитывая, что сумма $W_{з\text{ АБ1}}$ и $W_{з\text{ АБ2}}$ равна $W_{з\text{ АБ}}$, сумма $W_{р\text{ АБ1}}$ и $W_{р\text{ АБ2}}$ равна $W_{р\text{ АБ}}$, сумма P_{H1} и P_{H2} равна P_H , а сумма $P_{СБУ1}$ и $P_{СБУ2}$ равна $P_{СБУ}$, выражение энергобаланса (3) примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{zyi}} P_{СБУ}(t, \Delta\tau_{zyi}) dt = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{zyi}} \frac{P_H(t, \Delta\tau_{zyi})}{\eta_k \eta_{VD}} dt + \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{pyi}} \frac{P_H(t, \Delta\tau_{pyi}) - P_{СБУ}(t, \Delta\tau_{pyi})\eta_k \eta_{VD}}{\eta_k \eta_{VD} \eta_{р\text{ АБ}} \eta_{з\text{ АБ}}} dt. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) справедливо для части периода работы СЭС. Чтобы получить выражение энергобаланса для всего периода работы СЭС, необходимо записать выражение распределения мощности СБ в нагрузку при избытке её мощности и заряженных АБ (m интервалов времени $\Delta\tau_{CHi}$)

$$\sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta\tau_{CHi}} P_{СБУ}(t, \Delta\tau_{CHi}) dt = \frac{1}{\eta_k \eta_{VD}} \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta\tau_{CHi}} P_H(t, \Delta\tau_{CHi}) dt, \quad (9)$$

а также необходимо записать энергию, генерируемую СБ, и энергию, потребляемую нагрузкой на периоде T работы СЭС через три режима работы СЭС (дефицит мощности СБ, избыток мощности СБ, избыток мощности СБ и заряженная АБ)

$$\int_0^T P_{СБУ}(t) dt = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{zyi}} P_{СБУ}(t, \Delta\tau_{zyi}) dt + \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta\tau_{CHi}} P_{СБУ}(t, \Delta\tau_{CHi}) dt + \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{pyi}} P_{СБУ}(t, \Delta\tau_{pyi}) dt; \quad (10)$$

$$\int_0^T P_H(t) dt = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{zyi}} P_H(t, \Delta\tau_{zyi}) dt + \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta\tau_{CHi}} P_H(t, \Delta\tau_{CHi}) dt + \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{pyi}} P_H(t, \Delta\tau_{pyi}) dt. \quad (11)$$

Чтобы получить выражение энергобаланса СЭС на основе матричного преобразователя тока СБ на всём периоде работы СЭС, необходимо выразить выражение (8) через подстановку выражений (9), (10) и (11). Сгруппированное выражение энергобаланса имеет вид

$$\int_0^T P_{СБУ}(t)dt = \frac{1}{\eta_k \eta_{VD}} \int_0^T P_H(t)dt + \frac{1 - \eta_p \eta_{AB} \eta_{з AB}}{\eta_k \eta_{VD} \eta_p \eta_{AB} \eta_{з AB}} \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{pyi}} (P_H(t, \Delta \tau_{pyi}) - P_{СБУ}(t, \Delta \tau_{pyi}) \eta_k \eta_{VD}) dt. \quad (12)$$

Полученное выражение энергобаланса (12) позволяет рассчитывать требуемую площадь СБ при заданных циклограммах мощности нагрузки и освещённости СБ (функция косинуса Келли $\cos K(t)$). С помощью функции косинуса Келли можно получить функцию изменения максимальной мощности $P_{СБ \max}(t)$, а применив понятие коэффициента $K(t)$ использования вольт-амперной характеристики СБ [6], можно выразить генерируемую мощность СБ при работе в составе СЭС (с недобором мощности СБ из-за отсутствия её экстремального регулятора). Функция отбираемой от СБ мощности $P_{СБУ}(t)$ имеет вид

$$P_{СБУ}(t) = K(t) P_{СБ \max}(t) = K(t) P_{СБ \text{ уд}} \cos K(t) S_{СБ}, \quad (13)$$

где $P_{СБ \text{ уд}}$ – удельная мощность СБ, снимаемая с площади 1 м² при $\cos K = 1$; $S_{СБ}$ – площадь СБ.

Для примера на рис. 4 приведены диаграммы функций $P_{СБУ}$ ($P_{СБУ \text{ К1}}$ – диаграмма функции генерируемой мощности СБ при $K(t) = 0,8$; $P_{СБУ \text{ К2}}$ – диаграмма функции генерируемой мощности СБ при линейно нарастающем $K(t)$ от 0,6 до 1). Подставив правую часть выражения (13) в выражение энергобаланса (12), можно рассчитать, например средствами MatLab, необходимую для энергобаланса площадь СБ при заданных циклограммах мощностей нагрузки и освещённости и при заданном $K(t)$. Найденное таким образом значение площади СБ позволяет определить значение энергии СБ, которая в свою очередь необходима для расчёта коэффициента энергетической эффективности $K_{Э}$ [4, 5]:

$$K_{Э} = \int_0^T P_H(t)dt / \int_0^T P_{СБ \max}(t)dt. \quad (14)$$

Для СЭС на базе матричного преобразователя тока СБ построена имитационная модель в программном пакете MatLab [7], которая позволяет оценить необходимую для энергобаланса площадь СБ и коэффициент $K_{Э}$ при заданных функциях изменения мощности нагрузки и освещённости СБ. Чтобы проверить сходимость расчётных значений, полученных с помощью выражения энергобаланса (12), со значениями, полученными при моделировании, были заданы тестовые функции изменения освещённости СБ и нагрузки P_H (на рис. 4 приведена для примера функция изменения мощности СБ $P_{СБ \max}$ при площади СБ, равной 10 м²). В результате проведённых численных экспериментов найденное значение площади СБ в имитационной модели имело ошибку 1,7% от расчётного значения, а значение коэффициента энергетической эффективности имело ошибку 4,6%. Полученные результаты позволяют судить о достоверности полученного выражения (12) энергобаланса СЭС с регулятором мощности на базе матричного преобразователя тока СБ.

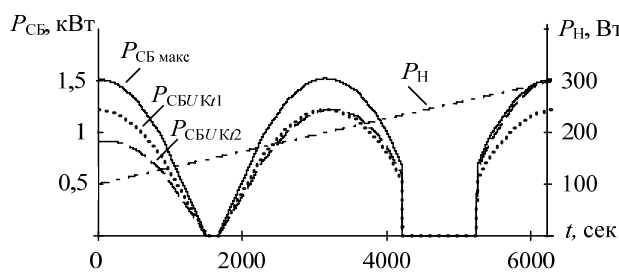


Рис. 4. Диаграммы тестовых функций изменения мощности СБ и нагрузки

Выражение энергобаланса (12) позволило получить для СЭС на базе матричного преобразователя тока СБ зависимость коэффициента энергетической эффективности $K_{Э \text{ мпт}}$ от коэффициента λ – степени совпадения графиков мощности СБ и нагрузки, который характеризуется долей энергии, передаваемой по цепям заряда-разряда АБ:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{pyi}} (P_H(t, \Delta \tau_{pyi}) - P_{СБУ}(t, \Delta \tau_{pyi}) \eta_k \eta_{VD}) dt / \int_0^T P_H(t) dt. \quad (15)$$

На рис. 5 приведена зависимость коэффициента энергетической эффективности $K_{Э \text{ мпт}}$ при интегральном коэффициенте использования вольт-амперной характеристики СБ, равном 0,85, при КПД АБ ($\eta_{р AB} \eta_{з AB}$) равном 0,9, КПД выходных диодов $\eta_{VD} = 0,963$, КПД ключей матричного преобразователя тока $\eta_k = 0,99$. Для сравнения на рис. 5 приведены известные зависимости коэффициентов энергетической эффективности СЭС [5] с параллельно-последовательной структурой ($K_{Э \text{ ппс}}$), с последовательной структурой ($K_{Э \text{ пс}}$) и с параллельной структурой ($K_{Э \text{ пас}}$).

Как видно из приведённых на рис. 5 зависимостей K_{Σ} , СЭС на базе матричного преобразователя имеет более низкий K_{Σ} , чем у СЭС с параллельно-последовательной структурой и с последовательной структурой, однако выше, чем у СЭС с параллельной структурой. Это говорит о том, что СЭС на базе матричного преобразователя тока СБ имеет наибольшую энергетическую эффективность на фоне СЭС со структурами без экстремального регулятора мощности СБ. К ещё большему увеличению коэффициента K_{Σ} в СЭС на базе матричного преобразователя тока СБ может привести уменьшение потерь на выходных диодах путём их замены на транзисторные ключи со специальной схемой управления.

Литература

1. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, 1990. – 336 с.
2. Комплекс управления системой электроснабжения малого космического аппарата / В.В. Наркевич, В.В. Омелянчук, А.С. Романенко и др. // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во НТЛ, 2011. – С. 49–54.
3. Пат. 95 191 РФ, МПК H02J 7/34, H02J 7/35. Автономная система электроснабжения с секционированной солнечной батареей / К.Г. Гордеев, В.В. Наркевич, А.С. Романенко, Я.М. Тевелевич, В.Г. Шевченко (РФ). – № 2 010 106 581 / 22; заявл. 24.02.2010; опубл. 10.06.10. – Бюл. № 16.
4. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с.
5. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 152–155.
6. Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразователями постоянного напряжения / А.В. Осипов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 1 (27). – С. 14–19.
7. Романенко А.С. Модель автономной системы электроснабжения с секционированной солнечной батареей в пакете MatLab / А.С. Романенко, В.Д. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 269–274.

Романенко Алексей Сергеевич

Мл. науч. сотрудник лаб. импульсно-модуляционных энергетических систем ТУСУР

Тел.: +7-923-424-86-54

Эл. почта: alnast3@gmail.com

Кобзев Анатолий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор, президент ТУСУР

Тел.: +7 (382-2) 51-05-30

Эл. почта: office@tusur.ru

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУР

Тел.: +7-913-821-22-92

Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Romanenko A.S., Kobzev A.V., Semenov V.D.

Energy balance in autonomous power supply system based on solar battery current matrix converter

This paper presents the expression of energy balance power supply system with a power regulator on the basis of the matrix converter current solar cell is presented. This expression allows to calculate the area of the solar cell, which is necessary for performing the energy balance at the given light and power load patterns. Thus the determined size of the solar battery allows to calculate energy efficiency ratio of power supply system and compare it to the power supply systems based on other structures.

Keywords: power supply system, energy balance expression, matrix converter.

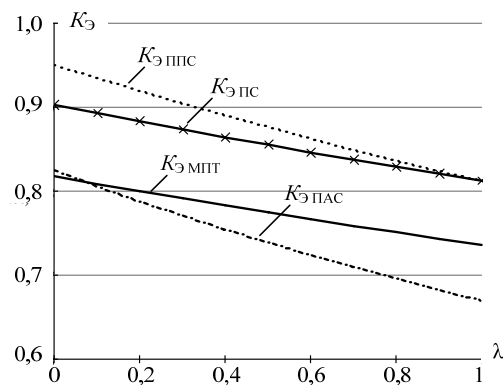


Рис. 5. Зависимости коэффициента энергетической эффективности СЭС от степени совпадения графиков мощности СБ и нагрузки