

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 рассчитывать площадь солнечной батареи, необходимой для выполнения условия энергобаланса при заданных циклографмах освещённости и мощности нагрузки. Найденная таким образом площадь солнечной батареи позволяет рассчитывать 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...СБ_z), ключи матричного преобразователя тока (К1.1 ... К_z.2), систему управления данными ключами (СУ), аккумуляторные батареи (АБ1, АБ2), выходные диоды (VD1, VD2) и выходные ключи (Кв1, Кв2).

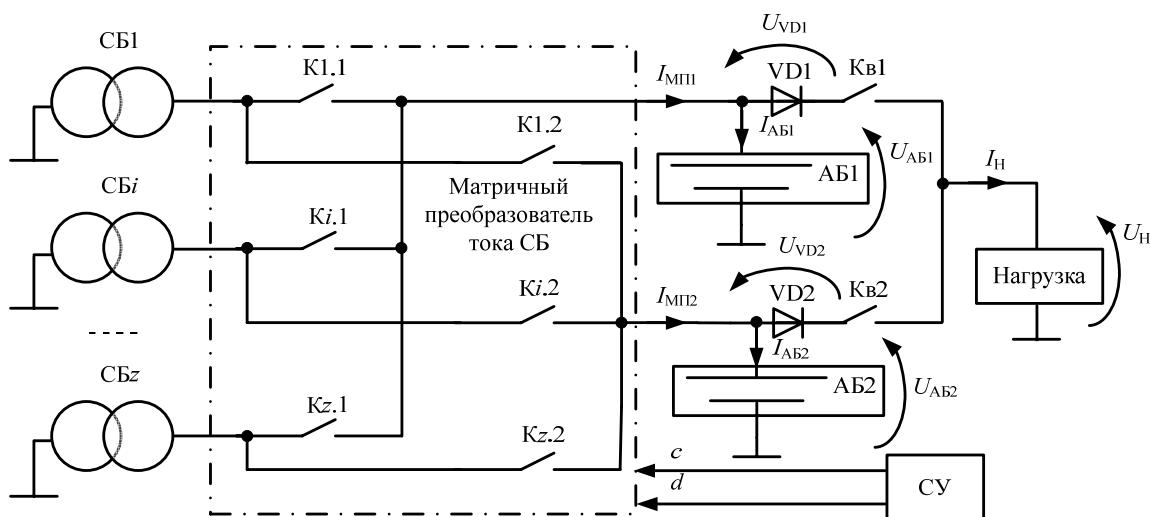


Рис. 1. Структура СЭС на базе матричного преобразователя тока СБ

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_{MP1} , I_{MP2} 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:

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

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

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 $W_{\text{РАБ}}$ равна нулю. Данное условие соблюдается, если энергия разряда $W_{\text{РАБ}}$ за период T равна энергии заряда АБ W_3 АБ. 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 $\Delta t_{\text{РУ}}$) и избытке (интервалы времени $\Delta t_{\text{ЗУ}}$), показанных на рис. 2 и 3.

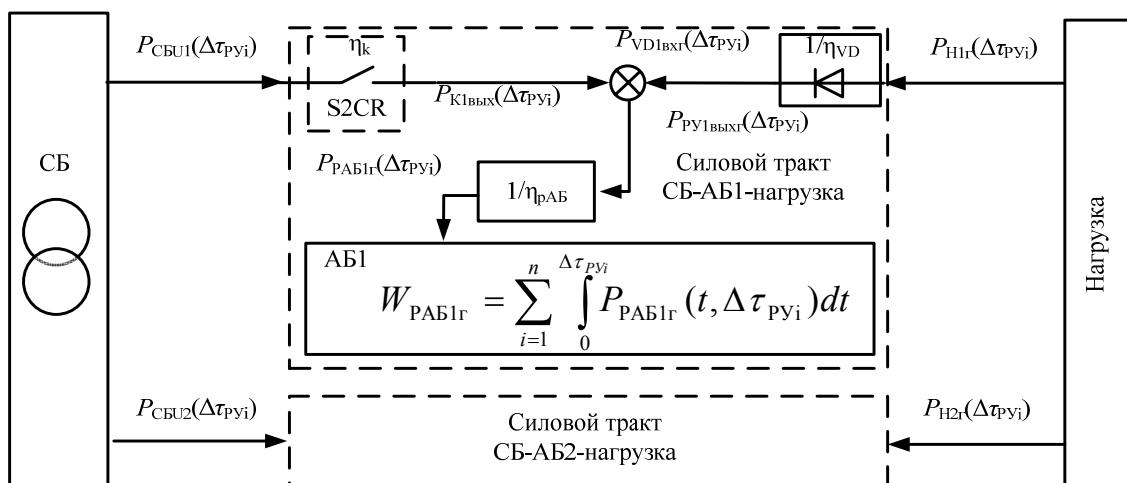


Рис. 2. Схема распределения мощности СБ при её дефиците

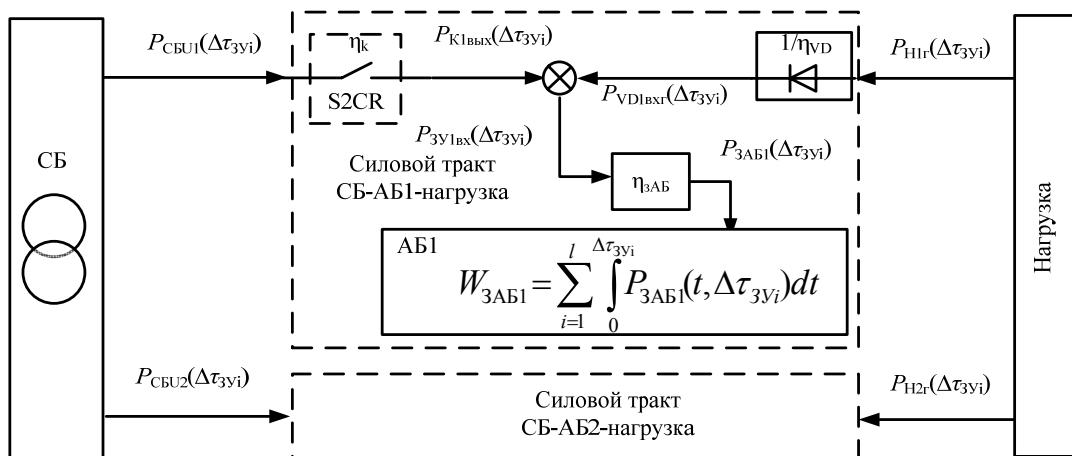


Рис. 3. Схема распределения мощности СБ при её избытке

В данных схемах силовые элементы АРКСЭС представлены звенями 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 η_{3AB} , а потери мощности при разряде – звеном η_{pAB} .

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 $P_{pAB}(\Delta\tau_{Pyi})$ разрядной мощности АБ1 имеет следующий вид:

$$P_{pAB}(\Delta\tau_{Pyi}) = -P_{pAB1}(\Delta\tau_{Pyi}) = \frac{P_{CBU1}(\Delta\tau_{Pyi})\eta_k + P_{H1g}(\Delta\tau_{Pyi})/\eta_{VD}}{\eta_{pAB}} = \frac{P_{H1}(\Delta\tau_{Pyi})/\eta_{VD} - P_{CBU1}(\Delta\tau_{Pyi})\eta_k}{\eta_{pAB}}, \quad (4)$$

где $P_{H1}(\Delta\tau_{Pyi})$ – мощность, потребляемая нагрузкой из цепи АБ1; $P_{CBU1}(\Delta\tau_{Pyi})$ – мощность, отдаваемая СБ в цепь АБ1.

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

$$W_{pAB1} = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{Pyi}} \frac{P_{H1}(t, \Delta\tau_{Pyi})/\eta_{VD} - P_{CBU1}(t, \Delta\tau_{Pyi})\eta_k}{\eta_{pAB}} dt. \quad (5)$$

Согласно схеме распределения при избытке мощности СБ выражение $P_{3AB1}(\Delta\tau_{3Yi})$ зарядной мощности АБ1 имеет следующий вид:

$$P_{3AB1}(\Delta\tau_{3Yi}) = (P_{CBU1}(\Delta\tau_{3Yi})\eta_k + \frac{P_{H1g}(\Delta\tau_{3Yi})}{\eta_{VD}})\eta_{3AB} = (P_{CBU1}(\Delta\tau_{3Yi})\eta_k - \frac{P_{H1}(\Delta\tau_{3Yi})}{\eta_{VD}})\eta_{3AB}. \quad (6)$$

Чтобы получить выражение зарядной энергии АБ1 на интервалах времени $\Delta\tau_{3Yi}$, необходимо проинтегрировать выражение (6):

$$W_{3AB1} = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{3Yi}} \eta_{3AB} (P_{CBU1}(t, \Delta\tau_{3Yi})\eta_k - \frac{P_{H1}(t, \Delta\tau_{3Yi})}{\eta_{VD}}) dt. \quad (7)$$

Аналогично составляются выражения для W_{pAB2} и W_{3AB2} . Учитывая, что сумма W_{3AB1} и W_{3AB2} равна W_{3AB} , сумма W_{pAB1} и W_{pAB2} равна W_{pAB} , сумма P_{H1} и P_{H2} равна P_H , а сумма P_{CBU1} и P_{CBU2} равна P_{CBU} , выражение энергобаланса (3) примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{3Yi}} P_{CBU}(t, \Delta\tau_{3Yi}) dt = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{3Yi}} \frac{P_H(t, \Delta\tau_{3Yi})}{\eta_k \eta_{VD}} dt + \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{Pyi}} \frac{P_H(t, \Delta\tau_{Pyi}) - P_{CBU}(t, \Delta\tau_{Pyi})\eta_k \eta_{VD}}{\eta_k \eta_{VD} \eta_{pAB} \eta_{3AB}} dt. \quad (8)$$

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 $\Delta\tau_{CHi}$)

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

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)

$$\int_0^T P_{CBU}(t) dt = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{3Yi}} P_{CBU}(t, \Delta\tau_{3Yi}) dt + \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta\tau_{CHi}} P_{CBU}(t, \Delta\tau_{CHi}) dt + \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{Pyi}} P_{CBU}(t, \Delta\tau_{Pyi}) dt; \quad (10)$$

$$\int_0^T P_H(t) dt = \sum_{i=1}^l \int_0^{\Delta\tau_{3Yi}} P_H(t, \Delta\tau_{3Yi}) dt + \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta\tau_{CHi}} P_H(t, \Delta\tau_{CHi}) dt + \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta\tau_{Pyi}} P_H(t, \Delta\tau_{Pyi}) dt. \quad (11)$$

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

$$\int_0^T P_{СБU}(t)dt = \frac{1}{\eta_k \eta_{VD}} \int_0^T P_H(t)dt + \frac{1 - \eta_p \eta_B \eta_z \eta_B}{\eta_k \eta_{VD} \eta_p \eta_B \eta_z \eta_B} \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{Pyi}} (P_H(t, \Delta \tau_{Pyi}) - P_{СБU}(t, \Delta \tau_{Pyi}) \eta_k \eta_{VD}) dt. \quad (12)$$

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 $P_{СБ \text{ макс}}(t)$, 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 $P_{СБU}(t)$ имеет вид

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

где $P_{СБ \text{ уд}}$ – удельная мощность СБ, снимаемая с площади 1 м^2 при $\cos K = 1$; $S_{СБ}$ – площадь СБ.

Для примера на рис. 4 приведены диаграммы функций $P_{СБU}$ ($P_{СБU \text{ К1}}$ – диаграмма функции генерируемой мощности СБ при $K(t) = 0,8$; $P_{СБU \text{ К2}}$ – 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 $K_{\mathcal{E}}$ [4, 5]:

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{\int_0^T P_H(t)dt}{\int_0^T P_{СБ \text{ макс}}(t)dt}. \quad (14)$$

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 $K_{\mathcal{E}}$ 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 $P_{СБ \text{ макс}}$ при площади СБ, равной 10 м^2).

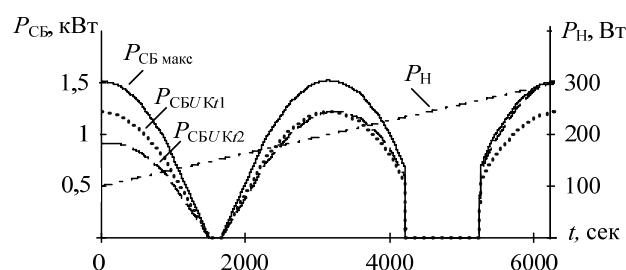


Рис. 4. Диаграммы тестовых функций изменения мощности СБ и нагрузки

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.

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

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

На рис. 5 приведена зависимость коэффициента энергетической эффективности $K_{\mathcal{E} \text{ МП}}$ при интегральном коэффициенте использования вольт-амперной характеристики СБ, равном 0,85, при КПД АБ ($\eta_p \text{ АБ}$ $\eta_z \text{ АБ}$) 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 ($K_{\mathcal{E} \text{ ППС}}$), с последовательной структурой ($K_{\mathcal{E} \text{ ПС}}$) и с параллельной структурой ($K_{\mathcal{E} \text{ ПАС}}$).

Как видно из приведённых на рис. 5 зависимостей $K_{\mathcal{E}}$, СЭС на базе матричного преобразователя имеет более низкий $K_{\mathcal{E}}$, 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 $K_{\mathcal{E}}$ 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. Омельянчук, 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. Ислеев. – 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 ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 269–274.

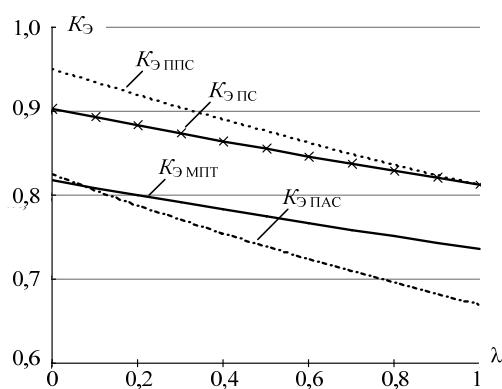


Рис. 5. Зависимости коэффициента энергетической эффективности СЭС от степени совпадения графиков мощности СБ и нагрузки

Романенко Алексей Сергеевич

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

Тел.: +7-923-424-86-54

Эл. почта: alnast3@gmail.com

Кобзев Анатолий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор, президент ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 51-05-30

Эл. почта: office@tusur.ru

Семенов Валерий Дмитриевич

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

Тел.: +7-913-821-22-92

Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Romanenko A.S., Kobzев 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.