

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

Розглянуто сезонні варіації максимальних добових значень фотоструму і добові варіації фотоструму на сонячних батареях різної орієнтації, вплив поглинання та розсіяння сонячного випромінювання в атмосфері для умов відсутності або слабкої хмарності та для хмарних умов. Модель освітленості з урахуванням хмарності враховує: географічне положення та орієнтацію батарей відносно сонця, поглинання у безхмарній атмосфері, дифузну складову інсоляції, поглинання хмарністю. Поглинання хмарністю задається емпіричною функцією від середнього денного балу хмарності за метеоданими.

Ключові слова: прозорість атмосфери, емпірична модель, інсоляція, хмарність, сонячні батареї.

Рассматриваются сезонные вариации максимальных суточных значений фототока, и суточные вариации фототока на солнечных батареях различной ориентации, влияние поглощения и рассеяния солнечного излучения в атмосфере для условий отсутствия или слабой облачности и для облачных условий. Модель освещенности с учетом облачности учитывает: географическое положение и ориентацию батарей относительно солнца, поглощение в безоблачной атмосфере, диффузную составляющую инсоляции, поглощение облачностью. Поглощение облачностью задается эмпирической функцией от среднего дневного балла облачности по метеоданным.

Ключевые слова: прозрачность атмосферы, эмпирическая модель, инсоляция, облачность, солнечные батареи.

The seasonal and diurnal variations of experimental photo-current in conjunction with panels space orientation, the absorption and diffusion effect of solar radiation in atmosphere for low cloudiness or cloudless conditions and for cloudiness conditions are discussed. The empirical model with cloudiness accounting considers: geographical location and orientation of the cells relative to the sun; the regular absorption in the clear atmosphere; diffuse component of insolation and cloud absorption. Cloud absorption is given by the empirical function of the daily average cloudiness, obtained of the meteorological data.

Key words: atmospheric transparency, empirical model, insolation, cloudiness, solar battery.

Енергетическіе характеристики сонечных фотоелектрических батарей зависяť от ряда факторов. Наиболее значимым фактором является поток сонечного излучения, определяемый географическими и климатическими условиями, временем года и суток, ориентацией сонечной батареи относительно направления на Солнце. Большая часть этих параметров поддаются детерминированному учету через освещенность. Описание количественной модели фототока для безоблачных условий и сравнение с результатами измерений приведено в работах [1; 2]. Там же отмечена необходимость доработки модели с учетом облачности.

В работе [3] отмечается обилие (более 100) различных эмпирических зависимостей учета

поглощения облачностью для расчета инсоляции и приводится сравнительный анализ наиболее популярных моделей на базе экспериментальных данных, полученных на японских островах.

В работе [1] описан экспериментальный комплекс для исследования сезонно-суточных вариаций тока фотоелектрических батарей, и приводится описание простого алгоритма расчета потока сонечного излучения. Этот алгоритм учитывает только прямую радиацию, определяемую ориентацией сонечной батареи относительно направления на Солнце. Величина потока сонечного излучения на поверхность батареи пропорциональна $\cos \chi_p$, где χ_p – зенитный угол солнца относительно нормали к плоскости батареи. Взаимная ориентация батарей и

солнца определяется географическими координатами и ориентацией батареи, а так же временем года и суток. Соответствующие расчеты выполняются с помощью стандартного аппарата тригонометрических преобразований в сферических координатах [4].

На сезонные и суточные вариации потока солнечного излучения вблизи поверхности земли существенное влияние оказывают вариации поглощения при наклонном распространении в атмосфере. Вопросам измерения поглощения и рассеяния в атмосфере посвящено огромное количество работ. Например, обзоры методов и моделей в работах [4-6]. Общим недостатком этих моделей является их ориентация на конкретную методику измерения солнечной радиации с помощью тепловых актинометрических сенсоров. В связи с этим возникают вопросы применимости традиционных актинометрических моделей к кремниевым фотоэлектрическим батареям.

В настоящей работе приводятся результаты исследований по подбору наиболее адекватных эксперименту параметров модели тока фотоэлектрических батарей как для условий чистого неба, так и с учетом данных реальной облачности на

интервале исследований сентябрь 2012 – апрель 2014 в Николаевском регионе.

1. Влияние поглощения и рассеяния в атмосфере

Поглощение солнечного излучения при наклонном распространении в атмосфере для плоской и однородной по высоте атмосферы определяется только изменениями наклонного пути:

$$l_m = l_0 / \sin \chi,$$

где χ – зенитный угол солнца относительно горизонтальной поверхности земли. Поглощение в атмосфере при наклонном падении определяется известной формулой Бугера [5]

$$T_m = T_0^{l_m/l_0},$$

здесь T_0 – коэффициент прозрачности атмосферы при вертикальном падении.

При наклонном падении света путь, пройденный им в атмосфере, гораздо длиннее пути, пройденного светом при прямом падении (рис. 1). Для толстой, неоднородной по высоте сферической атмосферы поглощение является сложной функцией, учитывающей изменения спектрального состава излучения по высоте.

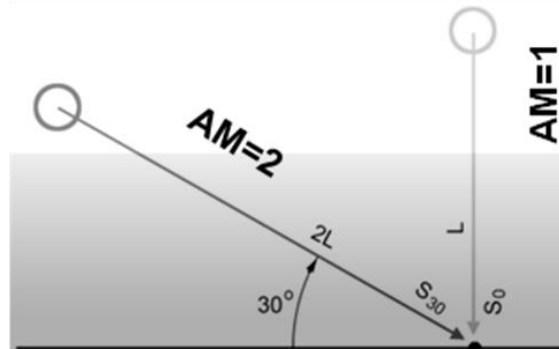


Рис. 1. Разница длин пройденного солнечным светом пути при прямом ($AM = 1$) и наклонном ($AM = 2$) падении

Для пересчета атмосферного поглощения для произвольной высоты солнца имеется целый ряд конкурирующих моделей. Так, например, в работе [3] перечень только наиболее популярных моделей состоит из 21 наименования. Большинство из этих моделей адаптированы под актинометрические измерения, т. е. измерения нагрева теплового датчика под действием солнечной радиации.

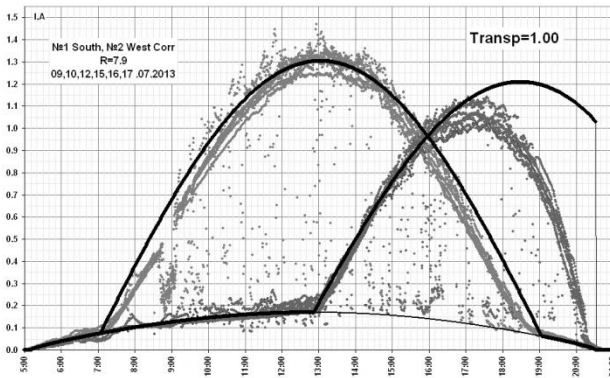
Спектральная чувствительность кремниевых фотоэлектрических батарей к различным длинам волн солнечного излучения может существенно отличаться от спектральной чувствительности классического актинометра. Поэтому трудно ожидать согласия в параметрах моделей, предназначенных для актинометрии, и моделей для расчета солнечной электроэнергии. Данное предположение подтверждает анализ результатов экспериментальных измерений.

Наиболее ярко эффекты влияния поглощения и рассеяния в атмосфере проявились при одновременных измерениях фототока на солнечных батареях с различной ориентацией. В экспериментах участвовало две батареи P02512 из поликристаллического

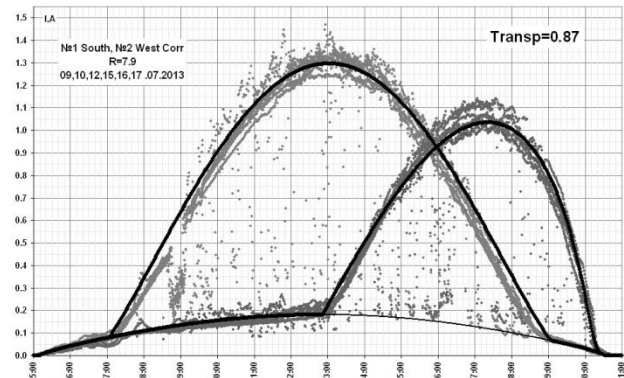
кремния. Обе батареи размещены на поворотной оси в так называемой полярной монтировке (ось направлена параллельно оси вращения земли – 47° от горизонта). Батарея № 1 направлена на Юг (стандартная ориентация), а батарея № 2 – на Запад. Каждая из панелей солнечной фотоэлектрической батареи имеет следующие параметры:

- максимальная мощность $P_{max} = 25 \text{ W}$;
- напряжение холостого хода $V_{OC} = 21.5 \text{ V}$;
- ток короткого замыкания $I_{SC} = 1.61 \text{ A}$;
- напряжение максимальной мощности $V_{OP} = 17.5 \text{ V}$;
- размеры: $645 \times 335 \times 24 \text{ mm}$;
- технология: поликристаллический кремний;
- количество элементарных элементов в батарее – 36.

Для обработки и анализа были отобраны наиболее безоблачные дни июля 2013 года. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости суточных вариаций экспериментального фототока для двух батарей. Здесь же линиями приведены результаты расчетов фототока для различных значений прозрачности.



а) Прозрачная атмосфера. $T_0 = 1.00$



б) Непрозрачная атмосфера. $T_0 = 0.87$

Рис. 2. Суточные вариации экспериментального фототока на батареях, ориентированных на Юг и на Запад, в сопоставлении с моделью с разными значениями прозрачности атмосферы

Зависимость на рис. 2а соответствует модели полностью прозрачной атмосферы $T_0 = 1.00$, а рис. 2б – модели со специально подобранным значением прозрачности $T_0 = 0.87$. В обоих вариантах используется наиболее простая модель поглощения в тонком плоском слое. Нижняя кривая соответствует диффузной (рассеянной) компоненте радиации, описываемой выражением:

$$D = D_0 \cdot \cos^{n_D} \chi,$$

здесь $D_0 = 0.15$ и $n_D = 0.75$.

Общая радиация определяется выражением, справедливым только для безоблачных условий:

$$F_G = F_0 \cdot (T_m \cdot \cos \chi_p + D),$$

здесь F_0 – радиация, неослабленная поглощением в атмосфере. Наибольший объем экспериментальных данных был получен на батарее № 0 из поликристаллического кремния SC-3722-9. В отличие от батарей № 1, № 2 эта батарея имеет фиксированную ориентацию.

На рис. 3 приведены результаты измерения максимального суточного тока – точки, и полуденных значений тока по модели в безоблачных условиях. Кривые на графике соответствуют модельным расчетам для прозрачности атмосферы $T_0 = 0.87$, и двух значений максимального тока батарей, отличающихся на 16 %.

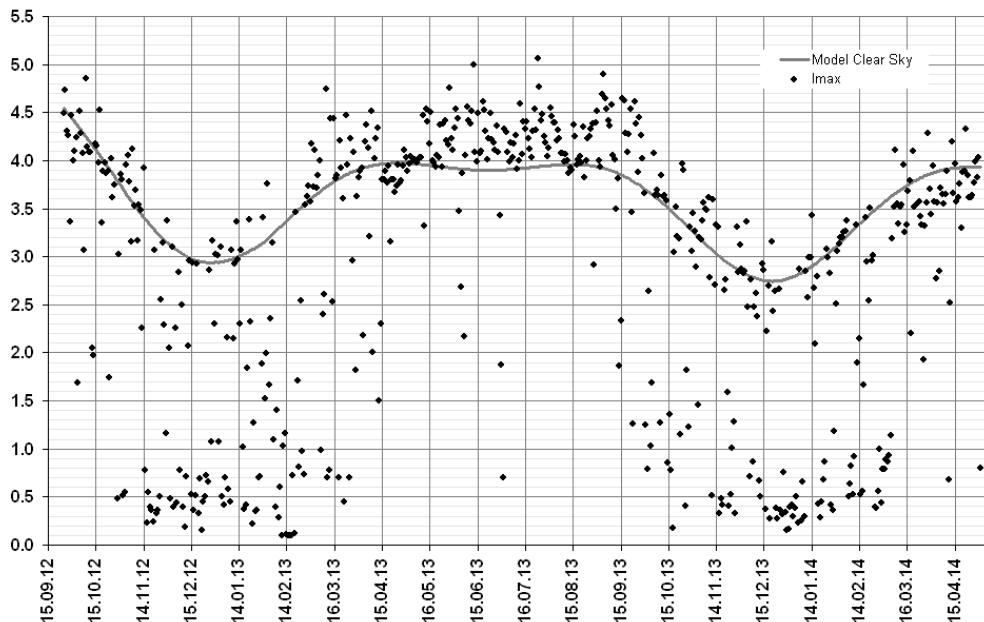


Рис. 3. Сезонные вариации полуденного и максимального суточного фототока в эксперименте и по модели

2. Эмпирическая модель влияния облачности

Описанная в [1; 2] модель учитывает регулярную часть инсоляции солнечных батарей. В частности, учитывается сезонно-суточная зависимость небесных координат Солнца, географические координаты и ориентация батарей. Эти расчеты выполняются с помощью стандартного аппарата тригонометрических преобразований в сферических координатах. Кроме

того, модель учитывает вариации ослабления в безоблачной атмосфере за счет изменения наклонного пути в атмосфере, при изменении высоты солнца.

По результатам сравнения суточного хода фототока на солнечных батареях различной ориентации, инсоляция была разделена на две компоненты: прямую и диффузную. Диффузная компонента составляет 15-25 % общей (глобальной)

инсоляции. Диффузная компонента не зависит от ориентации батарей, определяется некоторой степенной функцией зенитного угла солнца, и не зависит от атмосферного поглощения.

Учет влияния облачности выполнялся следующим образом:

– Были подобраны параметры модели инсоляции солнечных батарей для безоблачных условий по критерию наилучшего согласия с результатами экспериментальных измерений фототока солнечных батарей. Измерения проводились в Николаеве в период с сентября 2012 по октябрь 2013, и регистрировались в цифровом виде на микроконтроллерном регистраторе с темпом около 1 измерения в минуту.

– Рассчитаны значения среднесуточного фототока по модели и в эксперименте.

– Рассчитаны значения среднего балла общей облачности для дневных часов (9LT-15LT) по метеоданным Николаева [7]. Метеостанции регистрируют значения облачности несколько раз в сутки (интервал измерений составляет три часа). Данные по облачности в ночные часы не участвуют при расчете среднего балла облачности.

– Рассчитаны значения коэффициента ослабления облачностью (эксперимент относительно модели для безоблачных условий).

– Построена зависимость коэффициента ослабления от среднего балла дневной облачности. По этим данным построена эмпирическая зависимость, наилучшим образом описывающая медианы экспериментальных точек.

Фототок солнечной батареи определяется следующими факторами:

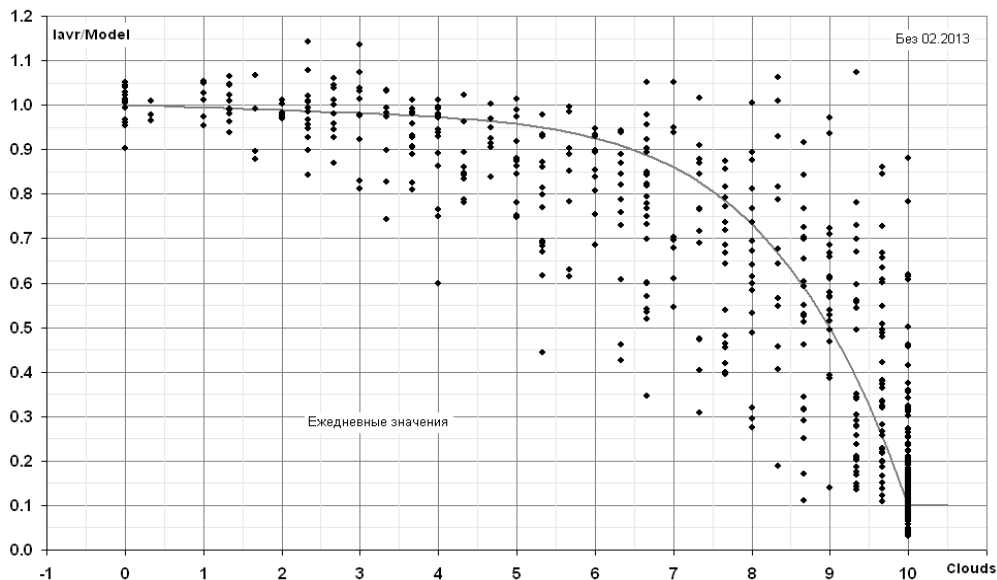


Рис. 4. Зависимость ослабления среднесуточного фототока от среднего дневного балла облачности

Для эмпирической функции ослабления K_{Cld} используется степенная функция от балла облачности B , обращаясь в 1 для $B = 0$ (облачность и ослабление отсутствуют), и принимающая некоторое минимальное значение K_{min} для максимальной облачности B_{max} (максимальное ослабление).

1. Ориентацией плоскости батареи относительно направления солнечных лучей и, естественно, условиями затенения батареи при заходе солнца за горизонт. Это задача сферической геометрии, и решается для сезонно-суточной модели положения солнца на небосводе. В отсутствии затенения $F_D = F_0 \cdot \cos \chi_P$, где χ_P – зенитный угол солнца относительно батареи. Среднесуточное значение получается усреднением внутри-суточных изменений.

2. Поглощением в безоблачной атмосфере. Чем ниже солнце, тем больший путь свет проходит в атмосфере, и тем больше его поглощение. Геометрическая задача. Приближенное выражение

для плоской атмосферы $K = K_0 \frac{1}{\cos \chi}$, где χ – зенитный угол солнца относительно поверхности земли. Прямая освещенность $F_{Dir} = F_D \cdot K$.

3. Диффузная – рассеянная компонента освещенности. Была добавлена по результатам сопоставления фототока батарей различной ориентации. Описывается функцией от зенитного угла солнца и **не зависит** от ориентации батареи.

$$D = D_0 \cdot (\cos \chi)^{n_D}; F_{Dif} = F_0 \cdot D.$$

4. Освещенность в безоблачных условиях определяется суммой прямой и диффузной компоненты.

$$F_{CISky} = F_{Dir} + F_{Dif}.$$

5. Влияние облачности определяется по среднему значению балла дневной облачности. Балл облачности равен нулю для безоблачных условий и 10 – для полной облачности.

Используется следующая эмпирическая формула для коэффициента ослабления облачностью:

$$K_{Cld} = 1 - (1 - K_{min}) \cdot \frac{B}{B_{max}} \cdot \left[\left(\frac{B}{B_{max}} \right)^{P_{ca}-1} + A_L \right] \cdot \frac{1}{1 + A_L},$$

где B – балл облачности; $B_{\max} = 10$ – максимальный балл облачности; P_{Cld} – показатель степени; A_L – линейный коэффициент; K_{\min} – минимальное значение коэффициента ослабления.

На рис.4 приведены экспериментальные точки и эмпирическая функция зависимости ослабления от балла облачности. Пример функции ослабления облачностью для: $P_{Cld} = 6$; $A_L = 0.7$; $K_{\min} = 0.1$.

6. Результирующая освещенность вычисляется через освещенность для чистого неба и ослабления облачностью $F = F_{CISky} \cdot K_{Cld}$.

7. Фототок вычисляется по значению максимального фототока за пределами атмосферы $I = I_0 \cdot (F / F_0)$. Здесь I_0 – фототок и F_0 – освещенность за пределами атмосферы. Значение может быть определено по КПД, площади и другим конструктивным параметрам солнечной батареи.

8. В работе [2] было отмечено присутствие некоторой аномалии в долговременных изменениях фототока солнечной батареи. Как показал анализ результатов последующих измерений, наиболее вероятной причиной этой аномалии является деградация фотоэлектрической батареи. Эффективность батареи относительно быстро упала примерно на 17 % с сентября 2012 по январь 2013. Потом скорость деградации заметно уменьшилась – дополнительное уменьшение эффективности составило около 4 % на интервале с января 2013 по апрель 2014 года. Соответствующие эффекты были учтены в модели внесением поправки в виде кусочно-линейной функции для двух интервалов времени – до и после января 2013 года.

На рис. 5 приведены результаты сопоставления эксперимента с моделью на многолетнем интервале – 09.2012-04.2014.

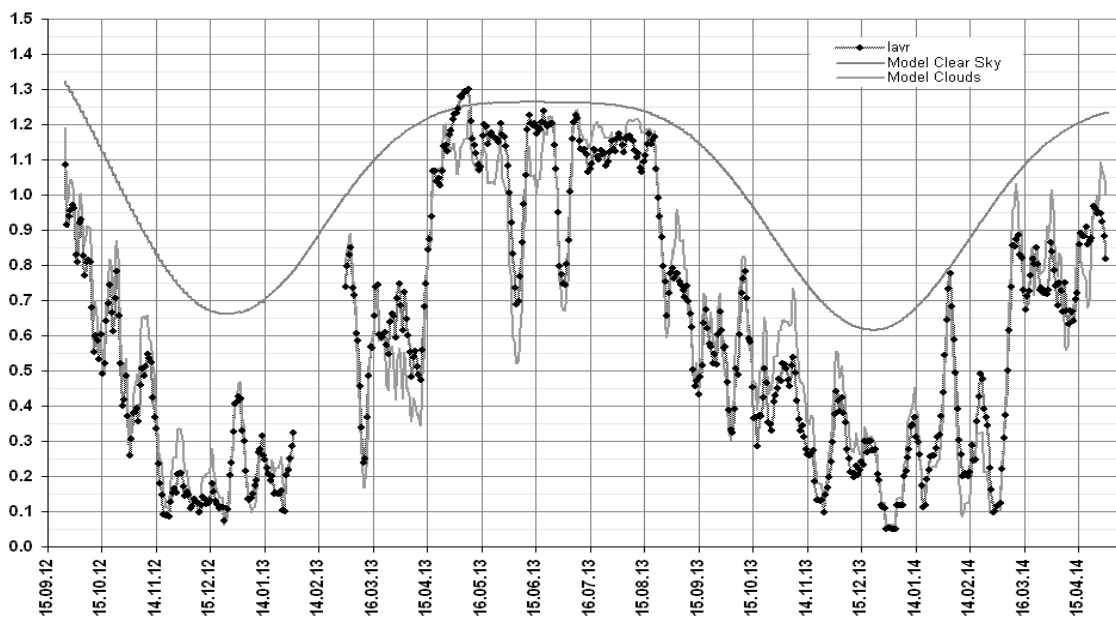


Рис. 5. Экспериментальные и модельные сезонные вариации среднесуточного тока с учетом влияния облачности (метеоданные) в модели, при скользящем усреднении по 7 дням

На графике представлены: экспериментальные значения среднесуточного фототока – точки; модель для безоблачного неба – плавная верхняя кривая; модель, учитывающая ослабление реальной облачностью, – нижняя ломаная кривая. Для уменьшения флуктуационной составляющей вариаций фототока и облачности к ним был применен метод скользящего усреднения по семи дням. Заметно, что кривая рассчитанных значений фототока достаточно точно повторяет кривую измеренных значений.

Естественно, что средний балл общей облачности не слишком хорошо воспроизводит ослабление инсоляции и фототока, так как балл облачности характеризует только степень (площадь) покрытия небосвода облаками, и не учитывает расположение облаков относительно направления на солнце. Так, относительно высокая облачность может не влиять на инсоляцию, если облака не отбрасывают тень на батарею. А относительно малая облачность может значительно ослабить инсоляцию, если тень от облака

попадет на батарею. Таким образом, инсоляция солнечной батареи приобретает вероятностный характер.

Для уменьшения влияния случайной составляющей изменения облачности на инсоляцию и среднесуточный ток солнечных батарей была выполнена операция скользящего усреднения по нескольким соседним дням. Оказалось, что уже при усреднении по двум дням отклонение экспериментальных значений фототока от модели резко уменьшается.

Для иллюстрации влияния усреднения на рис. 6 приведены регрессионные зависимости экспериментального и модельного фототока для двух способов усреднения: ежедневные среднесуточные значения; результаты скользящего усреднения на интервале в 7 дней. Усреднение значительно улучшает степень соответствия между моделью и экспериментом. Величина регулярной составляющей регрессии по критерию R^2 (достоверность) при усреднении возрастает от значения 0.84 до 0.98.

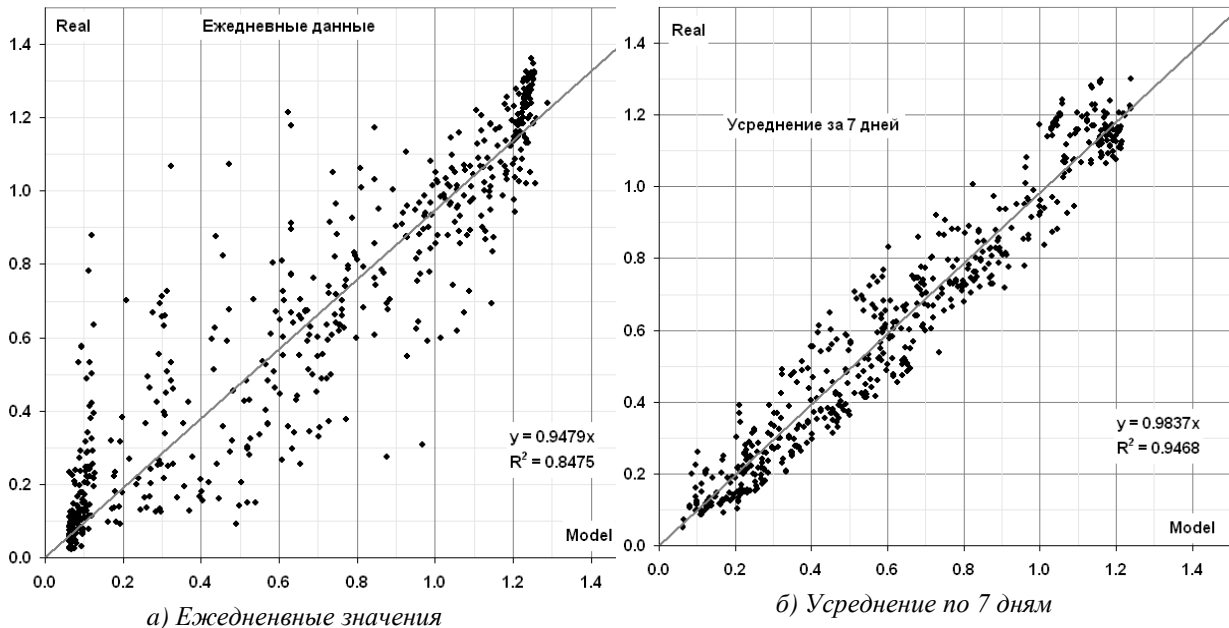


Рис. 6. Связь экспериментальных и модельных значений с учетом реальной облачности

В целом, результаты сопоставления демонстрируют высокую достоверность результатов моделирования как в части учета изменений освещенности в безоблачных условиях, так и учета облачности.

Для оценки эффективности фотоэлектрических солнечных батарей на многолетних интервалах времени были привлечены архивные метеоданные по облачности в городе Николаеве начиная с 2011 года

[7]. Это позволило значительно расширить интервал анализа модельного фототока во времени

На рис. 7 приведены результаты моделирования среднесуточных значений фототока. Верхняя, плавная кривая соответствует максимальным значениям фототока в условиях безоблачного неба. Сильно изрезанная, ломаная кривая соответствует усреднению по 7 дням, а менее изрезанная – усреднению по 30 дням.

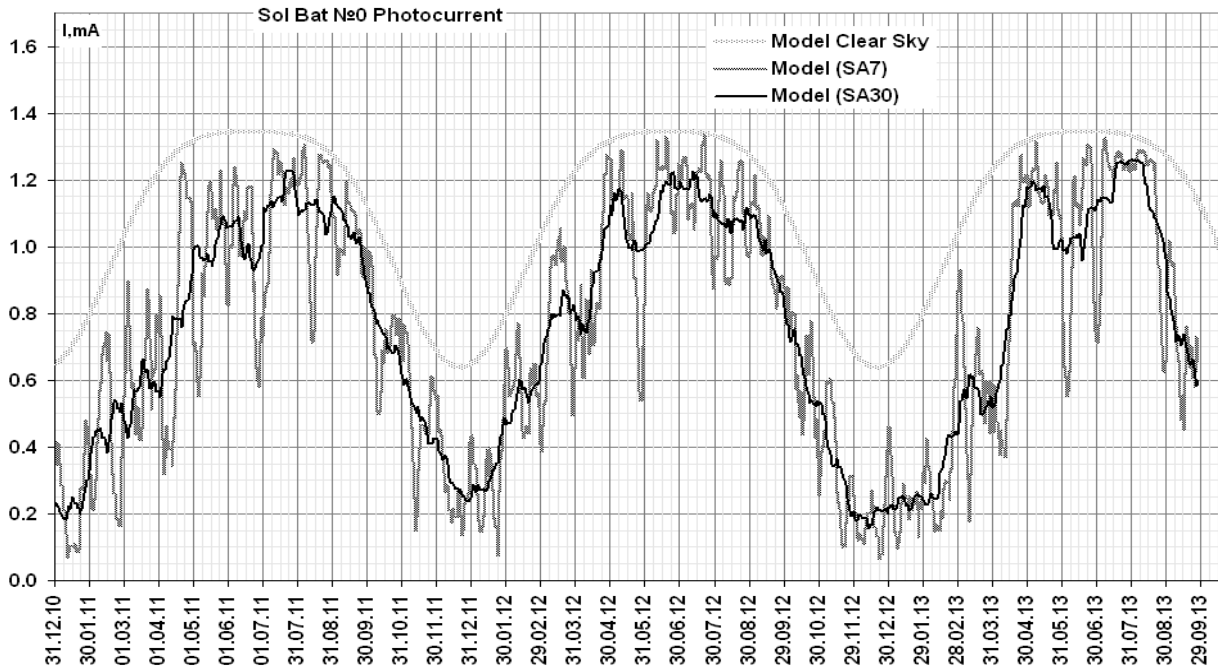


Рис. 7. Вариации среднесуточного фототока для условий безоблачного неба и с учетом реальной облачности, при скользящем усреднении по 7 и по 30 дням

3. Оценка общей эффективности солнечных батарей

Эти результаты были использованы для оценок влияния различных факторов на общую эффективность

солнечных батарей. Соответствующие оценки представлены на рис. 8.

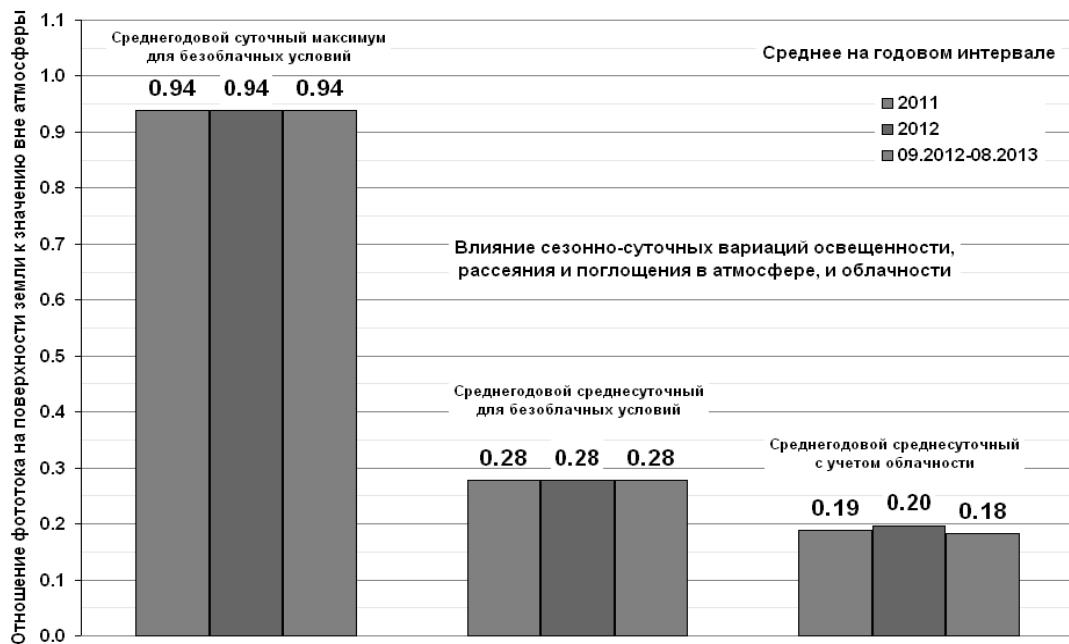


Рис. 8. Соотношение фототоков при разных условиях измерений на различных годовых интервалах

Первый и второй столбцы иллюстрируют среднегодовой суточный максимум и среднегодовое среднесуточное значение фототока для безоблачных условий для трех годовых интервалов – 2011, 2012 и 2013 годов соответственно. Последний столбец показывает отношение среднегодового среднесуточного значения фототока с учетом облачности к аналогичному значению вне атмосферы для тех же годовых интервалов.

Первый столбец – учет только сезонных изменений без учета суточных изменений и облачности. Сезонные изменения незначительно уменьшают эффективность – она падает до 94 %.

Второй столбец – учет сезонных и суточных изменений без учета облачности. Эффективность падает до 28 %.

Последний столбец – учет сезонных и суточных изменений, и учет реальной облачности. Эффективность заметно падает. В зависимости от года эффективность падает до величины 18-20 %. В среднем для трех лет эффективность падает до 19 %. Именно на эту величину и следует ориентироваться при оценках эффективности фотоэлектрических

Выводы и рекомендации

1. По результатам анализа суточных вариаций фототока солнечных батарей различной ориентации подобраны параметры модели поглощения (прозрачности) и рассеяния в атмосфере, наиболее согласующиеся с результатами экспериментальных измерений.

2. В условиях облачности максимальные значения фототока в ряде случаев превышают значения для безоблачных условий на величину порядка 25 %. Это явление, вероятнее всего, обусловлено дополнительным вкладом отражений от облаков в общую радиацию.

3. В сезонном ходе значений полуденного фототока в безоблачных условиях для солнечной батареи из аморфного кремния присутствует аномалия порядка 20 %. Эта аномалия, вероятнее всего, связана с деградацией батарей. Для батарей из поликристаллического кремния такой эффект не замечен.

4. В результате анализа вариаций среднесуточного тока солнечной батареи в сопоставлении с вариациями облачности, получена эмпирическая модель ослабления инсоляции фото-батарей облачностью.

5. Разработана модель инсоляции солнечных батарей с учетом облачности. Выполнено сопоставление результатов моделирования с результатами измерений на годовом интервале для Николаевского региона.

6. При усреднении по соседним дням ошибка описания моделью экспериментальных значений среднесуточного фототока существенно уменьшается.

7. Выполнены расчеты ожидаемой эффективности фотоэлектрических батарей для николаевского региона относительно паспортных данных, заявляемых изготовителем. Ожидаемая среднегодовая эффективность с учетом сезонных и суточных изменений и облачности близка к 19 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальные и теоретические исследования параметров солнечных фотоэлектрических батарей для оценки их энергетической эффективности / Андреев В. И., Кубов В. И., Кубова Р. М., Павленко А. А. // Наукові праці : науково-методичний журнал. – Т. 210. Вип. 198. Техногенна безпека. – Миколаїв : ЧДУ ім. Петра Могили, 2013. – С.129–136.

2. Экспериментальные и теоретические исследования параметров солнечных фотоэлектрических батарей с учетом географических и климатических условий / Кубов В. И., Кубова К. В., Кубова Р. М., Павленко А. А. // Украинский аэрокосмический журнал. – Николаев, 2012. – № 1 (6). – С. 30–42.
3. Shoichi Kizu. Systematic Errors in Estimating of Insolation by Empirical Formulas / Shoichi Kizu // Journal of Oceanography. – 1998. – Vol. 54. – P. 165–177.
4. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации / С. И. Сивков // Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1968. – 232 с.
5. Атмосфера // Справочник (справочные данные, модели). – Ленинград : Гидрометеоздат, 1991, – 510 с.
6. Gueymard C. A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models / C. A. Gueymard // Solar Energy. – 2003. – Vol. 74. – P. 355–379.
7. Метеоданные Николаева [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.pogoda.ru.net/weather.php?id=33846> – интернет ресурс на 04.05.2014.

Рецензенты: Кутковеций В. Я., д. т. н., профессор;
Мусиенко М. П., д. т. н., профессор.

© Андреева Н. Ю., Кубов В. И.,
Кубова Р. М., Павленко О. А.

Дата надходження статті до редколегії 07.05.2014 р.

АНДРЕЄВА Наталя Юрїївна – провідний спеціаліст, Чорноморський державний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

Коло наукових інтересів: електронні прилади для контролю середовища та біофізичних параметрів.

КУБОВ Володимир Ілліч – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Чорноморський державний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

Коло наукових інтересів: електронні прилади для контролю середовища та біофізичних параметрів.

КУБОВА Разія Махмутівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Московський університет ім. С. Ю. Вітте, м. Москва.

Коло наукових інтересів: електронні прилади для контролю середовища та біофізичних параметрів.

ПАВЛЕНКО Олена Андрїївна – магістр, Чорноморський державний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

Коло наукових інтересів: електронні прилади для контролю середовища та біофізичних параметрів.