

УДК 620.92

Л. И. Кныш

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Проведено численное исследование особенностей энергопереноса в солнечном фотоэлектрическом модуле. Температурные поля определялись на основе решения нестационарного двумерного уравнения теплопроводности в сопряжённой постановке. В математической модели учтены наиболее существенные географические, климатические и технологические факторы, влияющие на энергетические показатели солнечных модулей. Проведенные численные эксперименты позволили выявить общий температурный режим системы и сформулировать рекомендации по его минимизации.

Ключевые слова: солнечная батарея, солнечные элементы, нестационарное сопряженное уравнение теплопроводности, численное исследование.

Проведено чисельне дослідження особливостей енергопереносу в сонячному фотоелектричному модулі. Температурні поля визначались на основі розв'язання нестационарного двовимірного рівняння теплопровідності в спряженій постановці. В математичній моделі враховані найбільш суттєві географічні, кліматичні та технологічні фактори, що впливають на енергетичні показники сонячних модулів. Проведені чисельні експерименти дозволили виявити загальний температурний режим системи і сформулювати рекомендації щодо його мінімізації.

Ключові слова: сонячна батарея, сонячні елементи, нестационарне спряжене рівняння теплопровідності, чисельне дослідження.

The numerical research of energy transfer in the solar photovoltaic module was completed. The temperature fields were defined on the basis of non-stationary conjugate two-dimension equation of heat conduction. In the mathematic model accounted all significant geographical, climate and technology factors, which influence in the energy parametric of the solar modules. The numerical research allowed to reveal general temperature regime of the systems and to formulate recommendations for its minimization.

Key words: solar panel, solar cell, non-stationary conjugate equation of heat conduction, numerical research.

Введение. В настоящее время наблюдается повсеместное внедрение в энергетику Украины солнечных энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей. Такие системы применимы как для генерации электрического тока в промышленных масштабах, так и в автономных устройствах небольшой мощности.

В последние годы на Юге Украины и в Крыму массово вводились в эксплуатацию солнечные фотоэлектрические станции большой мощности, среди которых особенно выделяется энергетический комплекс Перово, мощность которого превышает 100 МВт. Экологическая безопасность и надёжность подобных станций общеизвестна. Однако при их строительстве и эксплуатации возникает ряд вопросов, решение которых связано со значительными трудностями. Проектирование подобных станций предполагает выведение из хозяйственного оборота значительных земельных площадей, существуют проблемы коммутации фотоэлектрических станций с энергораспределительными системами, кроме того, выработанное «зелёное электричество» поступает в основную генерирующую сеть, мощности которой не справляются с дополнительными нагрузками. Это несколько ограничивает перспективы промышленной фотовольтаики.

Автономные фотоэлектрические системы полностью лишены приведенных недостатков [1]. Они могут работать в низковольтном диапазоне при постоянном токе, обеспечивая системы освещения, приборы и аксессуары малой мощности. Но чаще такие системы работают в комплексе с инвертором, что позволяет преобразовывать постоянный ток низкого напряжения в переменный. Стоимость такой энергетической установки относительно высока, поэтому первоочередной задачей при проектировании можно считать оптимизацию энергетических характеристик солнечного модуля.

Эта задача связана с определением температурных показателей солнечной батареи (СБ), так как именно эти показатели в первую очередь влияют на её вольт-амперную характеристику [2]. Снижение эффективности при повышении температуры характерно для кремниевых солнечных элементов (СЭ) любого типа и составляет в среднем 0,43 – 0,47% на каждый градус. Если учесть, что при номинальном температурном режиме КПД монокристаллических СБ составляет 17 – 18% , поликристаллических – 12 – 14%, а СБ из аморфного кремния – 8 – 10%, то становится очевидно, что даже незначительный перегрев СБ может практически полностью её обесточить. Это указывает на необходимость формулировки достаточно чётких рекомендаций по расположению СБ, их ориентации, согласованию с архитектурными элементами основной постройки.

Постановка задачи. Конструктивно кремниевая СБ в общем случае представляет собой многослойную систему типа «триплекс», внутри которой осуществляется специфический внутренний энергоперенос, связанный с генерацией электрического тока. Математическая модель такого энергопереноса имеет сопряжённый характер и базируется на нестационарных уравнениях теплопроводности с нелинейными граничными условиями. Модель включает в себя уравнение теплопроводности для слоя солнечных элементов (СЭ):

$$C_p \rho \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{CЭ} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{CЭ} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y}) - P_{CЭ}(x, y, \tau) + P(x, y, \tau) + P_{Пог}(x, y, \tau), \quad (1)$$

где C_p , ρ и $\lambda_{CЭ}$ – теплоёмкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала СЭ; $P_{CЭ}(x, y, \tau)$ – удельная электрическая мощность, снимаемая с панели СЭ; $P(x, y, \tau)$ – удельная тепловая мощность, выделяемая в СБ вследствие прохождения через неё электрического тока; $P_{Пог}(x, y, \tau)$ – плотность теплового потока от солнца, поглощённого в слое СЭ;

уравнения теплопроводности для фронтального покрытия и подложки:

$$C_{pi} \rho_i \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_i \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_i \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y}), \quad (2)$$

где C_{pi} , ρ_i и λ_i – теплоёмкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала фронтального покрытия и подложки.

Система уравнений (1) – (2) дополняется граничными условиями на фронтальной поверхности

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(x, \delta, \tau)}{\partial y} = E_c(\tau) - \varepsilon \sigma T^4(x, \delta, \tau) - \alpha(T(x, \delta, \tau) - T_{OKP}(\tau)), \quad (3)$$

где $E_c(\tau)$ – плотность теплового потока от солнца; ε – приведённая степень черноты; σ – постоянная Стефана – Больцмана; α – коэффициент теплоотдачи между фронтальной поверхностью СБ и окружающей средой; $T_{OKP}(\tau)$ – температура окружающей среды.

На боковых поверхностях СБ ставились условия идеального теплового контакта, а на границы слоёв – граничные условия четвертого рода.

Начальные условия данной задачи имеют вид

$$T(x, y, 0) = T_{OKP}(0) = const. \quad (4)$$

Условия на тыльной стороне поверхности выбирались в зависимости от способа монтажа СБ. В случае плотного прилегания солнечного модуля к несущим поверхностям выбиралось условие тепловой изоляции. При наличии зазора проводился учёт лучистой и конвективной составляющих теплообмена с окружающей средой.

Метод решения. Представленная система уравнений (1) – (2) с начальными и граничными условиями решалась численно с использованием метода контрольных объёмов [3]. Использование этого метода при решении двумерных задач базируется на предположении, что протекание многомерного физического процесса – это результат последовательной реализации соответствующих одномерных процессов, каждый из которых начинается от распределения поля, возникшего после окончания предыдущего одномерного процесса. На основе такого «расщепления» задачи по пространственным координатам моделирование одномерных процессов проводится с помощью неявных схем, которые характеризуются своей устойчивостью. Последовательное действие процессов учитывается по существу явно решением задачи на каждом полуцелом шаге по времени.

В данной задаче важна последовательность расщепления. Очевидно, что использовать локально-одномерный метод можно лишь в поперечно-продольном направлении в связи с «пассивностью» граничных условий на боковых поверхностях СБ по сравнению с граничными условиями на фронтальной поверхности.

При составлении численного алгоритма необходимо учитывать множество факторов, часть из которых отражена в математической модели. Многие из этих факторов носят переменный характер и практически не поддаются точному математическому описанию. В частности, на работу СБ влияет величина облачности, которая может снизить выходную мощность более чем на 50%. Практически невозможно учесть такой важный показатель, как влажность воздуха. А ведь одна из полос поглощения солнечного излучения водяным паром лежит в диапазоне наиболее эффективной области работы СБ. Кроме того, влажность влияет также на процессы теплообмена СБ с окружающей средой. Учёт этих факторов в предложенной математической модели предполагается проводить введением специальных уточняющих коэффициентов, выбор которых основывается на климатических данных [4]. Эти коэффициенты влияют на величину теплового потока от солнца, среднее значение которой также выбиралось

на основе обобщённых статистических данных и зависело от географической широты местности и месяца года.

С климатическими особенностями связано также и вычисление коэффициента теплоотдачи α на фронтальной поверхности СБ. Значение этого коэффициента рассчитывалось на основе критериальных уравнений, в которых присутствует средняя скорость ветра, характерная для данного региона [5]. Кроме того, при отсутствии ветра на теплоотдачу от фронтальной поверхности СБ существенное влияние оказывает свободная конвекция, расчёт которой также проводился на основе полуэмпирических формул. При проведении исследований в качестве среднего выбирался максимальный коэффициент теплоотдачи между средним коэффициентом теплоотдачи при свободной конвекции $\overline{\alpha}_{СВ}$ и вынужденной $\overline{\alpha}_{ВЫН}$ $\alpha = \overline{\alpha} = \text{MAX}(\overline{\alpha}_{СВ}, \overline{\alpha}_{ВЫН})$.

В уравнение (1) в качестве источниковых членов входят величины, характеризующие особенности энергопереноса в тонком слое полупроводниковых кристаллов. Определение точных значений этих величин в рамках рассматриваемой модели практически невозможно. Доля лучистого потока от солнца, генерирующая электрический ток в СЭ, определяется через КПД используемых СЭ, значение которого существенно зависит от температуры. Согласование значения эффективности с температурным режимом СБ при создании численного алгоритма осуществлялось с использованием итерационного процесса.

Генерация электрического тока в слое полупроводниковых кристаллов – это сложный физический процесс, в котором переплетаются тепловые и квантомеханические свойства элементов. Характерной особенностью данного процесса является наличие выделения джоулева тепла $P(x, y, \tau)$, учёт которого представляет отдельную задачу [6]. Тепловое действие электрического тока является нежелательным, так как ведёт к дополнительному нагреву СЭ и в итоге к энергетическим потерям. Существуют стандартные способы минимизации этого теплового воздействия, однако полностью его устранить нельзя. В то же время значение плотности теплового потока, обусловленного прохождением электрического тока, существенно меньше плотности лучистого потока от солнца. Поэтому при рассмотрении задачи в данной постановке таким воздействием можно пренебречь.

Анализ результатов. Численно исследовалась модельная фотоэлектрическая батарея, которая функционирует на широте города Днепропетровска. Моделирование проводилось при температурном и ветровом потенциалах, характерных для июля. Значение инсоляции в этот период наивысшее, что позволяет определить максимальный уровень температур и предложить мероприятия по его минимизации. При расчётах был учтён переменный характер изменения солнечной активности в течение суток.

На рис.1 показано изменение среднеинтегральной температуры в слое монокристаллических кремниевых СЭ в течение суток. Верхний график иллюстрирует уровни температур при плотном прилегании СБ к элементам основной несущей конструкции. Это могут быть стены и крыша дома, а также другие опоры в зависимости от места предполагаемого функционирования СБ. Как видим, температура внутри слоя СЭ в полдень в этом случае приближается к 100°C , что практически наполовину снижает их эффективность.

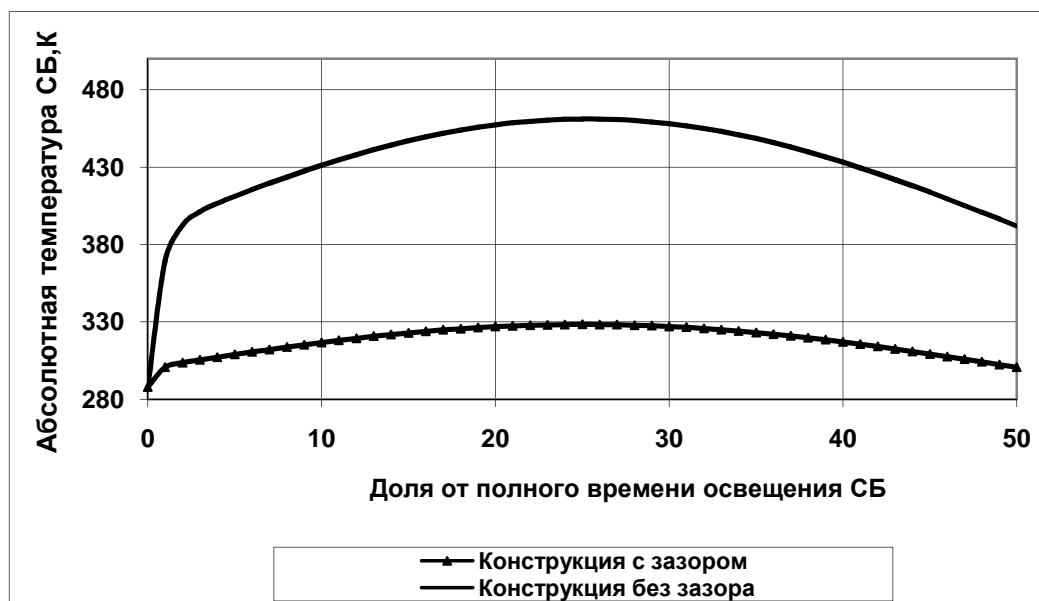


Рис. 1. Распределение средненеинтегральной температуры в слое СЭ в течение суток

Решение данной проблемы видится в создании воздушного зазора между панелью и несущей поверхностью. Такой подход обеспечит теплообмен не только с фронтальной стороны, но и с тыльной. Математически это отразится в граничных условиях. С тыльной стороны будут иметь место лучистые тепловые потери, выражаемые законом Стефана – Больцмана, а также конвективные потери, которые рассчитываются по аналогии с фронтальной поверхностью.

На рис. 1 нижний график иллюстрирует температурный уровень в слое СЭ при наличии конструктивного зазора с тыльной стороны. Как можно видеть, такое проектное решение существенно снижает температуру в слое СЭ, практически исключая энергетические потери.

Таким образом, на основе проведенных исследований можно обобщить основные рекомендации по установке автономных фотоэлектрических модулей в средних широтах. Известно, что максимальный поток фотонов проходит с минимальными потерями через атмосферу в южном направлении. То есть максимальный энергетический эффект от СБ будет получен при её ориентации на юг. В то же время повышение температурного уровня приводит к снижению КПД фотопреобразования. Высокие уровни температур оказывают также негативное влияние на герметизирующие материалы, качество которых во многом определяет срок службы СБ. Это говорит о том, что при установке СБ необходимо максимально обеспечить низкотемпературный режим её работы. Место установки должно быть хорошо освещено, не затеняемо, максимально проветриваемо [7]. Обязательным условием при установке СБ является наличие воздушного зазора между её тыльной поверхностью и элементами фасада зданий. Оптимальным для СБ является расположение её как отдельного модуля, не интегрированного в архитектурное решение здания. Однако такое решение редко удаётся реализовать из-за существенных усложнений коммуникаций, снижения надёжности конструкции и нерационального использования земельных ресурсов.

Выводы. На основе нестационарной сопряжённой математической модели энергопереноса в фотоэлектрическом модуле создан численный алгоритм и проведены исследования по определению температурных полей в слое СЭ. В модели учтены наиболее существенные географические климатические и технологические факторы, что влияют на общий энергоперенос в системе. Расчётные уровни температур указывают на возможное снижение эффективности солнечных модулей в случае их плотного прилегания к фасадным элементам. Создание максимально широкого конструктивного зазора позволит существенно снизить температурный режим СБ, оптимизировать её энергетические показатели.

Библиографические ссылки

1. **Баранов Н. Н.** Прямое преобразование энергии для автономной энергетики / Н. Н. Баранов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2000. – №8. – С. 23 –24.
2. **Юрченко А. В.** Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов / А. В. Юрченко, В. В. Волгин, С. А. Козлов // Изв. Томск. политех. ун –та. – 2009. – Т.314, №4. – С. 142 – 148.
3. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.,1984. – 152 с.
4. Климат Украины. Под ред. Г.Ф. Приходько. – Л., 1967. – 414 с.
5. **Михеев М. А.** Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия. – 1977. – 345с.
6. **Гуревич В. Л.** Выделение джоулева тепла при прохождении тока в наноструктурах: обзор / В. Л. Гуревич, М. И. Мурадов // Физика твердого тела. – 2012. – Т.54. – Вып.4. – С. 625 – 641.
7. **Кныш Л. И.** Влияние частичного затенения на тепловой режим солнечных модулей/ Л. И. Кныш // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб.наук. пр. – Д.: 2013. – Т.16. – С. 62 – 68.

Надійшла до редколегії 20.04.2014

УДК 539.3

О.В. Комаров

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ВПЛИВ АНІЗОТРОПІЇ СКЛАДОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН В ОКОЛІ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ

Досліджено напружено-деформівний стан в околі вершини тріщини, розташованої на межі поділу складових матеріалів в анізотропному біматеріальному просторі, під час дії зосередженого навантаження, прикладеного до берегів тріщини. Поставлену задачу зведено до системи задач лінійного спряження, розв'язок якої побудовано аналітично. Проаналізовано вплив анізотропії складових простору на напруження і переміщення.

Ключові слова: міжфазна тріщина, біматеріальний простір, задача лінійного спряження, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Исследовано напряженно-деформируемое состояние в окрестности вершины трещины, расположенной на границе раздела составляющих материалов в анизотропном биматериальном пространстве, при действии сосредоточенной нагрузки, приложенной к берегам трещины.

© Комаров О.В., 2014