

Расчёт оптимального угла наклона для выработки максимальной энергии от солнечной панели с использованием моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей¹

М.А. ЗАХИД^{1,2}, Г.Т. ЧАВАН¹, Я. Х. ЧО¹, ДЖ. Ы¹

¹Колледж информации и коммуникации, Университет Сонгюнган (SKKU), Сувон, Корея

²Кафедра электротехники, Университет инженерии и технологии, Таксила, Пакистан

Email: aleem12394@skku.edu

Аннотация

В этой статье были проанализированы и внедрены модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей для достижения максимальной электроэнергии, производимой солнечной (фотоэлектрической, далее ФЭ) панелью. Выбранные модели включают не только параметры, зависящие от местоположения, но и факторы окружающей среды, такие как мутность Линке (включая аэрозоли, поглощение из-за различных газов, рассеяние Рэлея), облачный покров, альbedo, заметные водяные пары. ФЭ панель мощностью 250 Вт была использована в качестве эталона для проверки выходной электроэнергии для данного положения, заданного широтой и долготой местоположения. Показано, что угол наклона панели 27°, ориентированный на юг, является оптимальным для каждого рассмотренного местоположения. Например, для положения Нагпур, Индия (21,14° с.ш., 79,08° в.д.) разница вычисленной электроэнергии с фактической, полученной с помощью пиранометров, пиргелиометров и люксометров, установленных Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL, The National Renewable Energy Laboratory), составляет всего 0,35 %. Таким образом, величина электроэнергии может быть вычислена путём объединения моделей представления ясного неба и интенсивности падающих лучей с заданной точностью.

Ключевые слова: солнечное излучение, облучённость, прямое излучение, диффузное излучение, отражённое поверхностью земли излучение, угол наклона, электроэнергия.

1. Введение

Солнечная энергия является новым, чистым и безопасным источником электроэнергии. Фотоэлектрический модуль непосредственно преобразует энергию света в электроэнергию. В действительности солнечное излучение, существующее над атмосферой Земли, имеет большую интенсивность, чем излучение, достигаемое поверхности Земли [1]. Потери связаны с поглощением атмосферными газами, облаками и другими атмосферными явлениями. Падающее солнечное излучение может генерировать на земле 1 кВт/м² при правильном преобразовании [2]. Статистика солнечного излучения и солнечной облучённости необходима инженерам и архитекторам для планирования и проектирования энергоэффективных зданий [3]. Для получения максимальной мощности электрического выхода из солнечной панели очень важна величина

солнечного облучения, падающего на конкретный регион и время пикового солнечного свечения. Солнечное излучение в каждой точке Земли может зависеть от различных параметров, таких как высота над уровнем моря, широта, долгота, географическое положение и влажность [4].

В статье было также рассмотрено влияние нескольких параметров окружающей среды, таких как воздушная масса, мутность по Линке (включая аэрозоли, рэлеевское рассеяние и поглощение различных газов), облачный покров, альbedo, заметные водяные пары, атмосферная мутность (дым, пыль, капли воды) и зависящие от местоположения параметры, такие как зенитный угол, азимутальный угол Солнца, высота над уровнем моря. В качестве эталона была выбрана солнечная панель 250 Вт, которая использовалась для измерения мощности в заданном местоположении. Было проведено исследование влияния ориентации и наклона солнечной панели на вырабатываемую мощность электроэнергии для определения максимальной отдачи солнечного излучения, падающего на неё. Солнечное излучение на наклонной поверхности представляет собой комбинацию прямого (лучевого), рассеянного и отражённого от Земли излучений [5]. С другой стороны, довольно сложно установить люксометры, датчики и пиранометры под каждым углом наклона и ориентацией для сбора всех необходимых данных. Поскольку измерения с использованием этого оборудования очень дороги, то для оценки мощности электроэнергии от солнечной панели была принята методология, основанная на выбранных моделях.

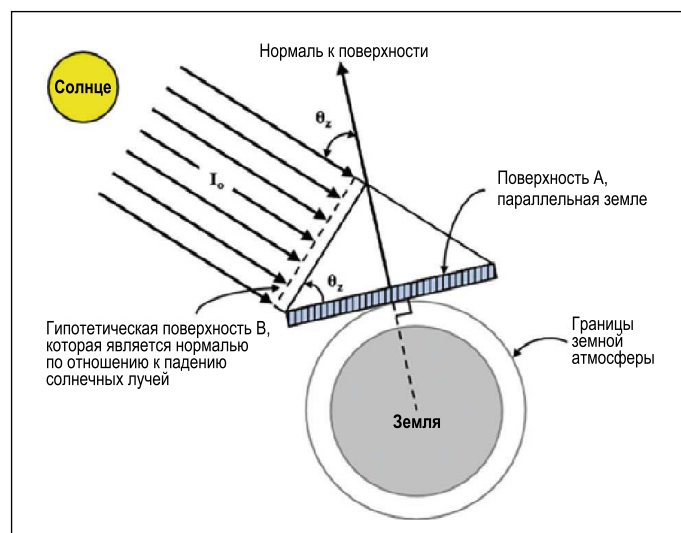


Рис. 1. Расчёт заатмосферной солнечной облучённости горизонтальной поверхности

¹ Перевод с англ. Т.В. Мешкова

Ранее оптимальный угол наклона солнечной панели был рассчитан для некоторых географических областей [6–9]. Новая идея настоящего исследования основана на анализе различных работ по этой теме. Цель этого подхода состоит в том, чтобы объединить модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей для прогнозирования различных компонентов солнечной облучённости на поверхности Земли. Основной целью этой работы является реализация оптимизированных моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей с высокой точностью прогнозирования в *MATLAB* для расчёта вырабатываемой электроэнергии для определённого местоположения на почасовой, ежемесячной и годовой основе. Соответствующие результаты представлены в графической форме. Также было проведено сравнение результатов расчёта с фактическими данными, полученными в Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии.

2. Процесс моделирования

2.1. Заатмосферная солнечная облучённость

Заатмосферная солнечная облучённость – это суммарная мощность солнечного излучения на верхней границе атмосферы Земли, проходящего через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку (рис. 1). Её можно вычислить с помощью выражения [10]:

$$E_{ext} = E_{SC} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right), \quad (1)$$

где $E_{SC} = 1367$ Вт/м², n – номер дня по юлианскому календарю.

Заатмосферную солнечную облучённость горизонтальной поверхности можно вычислить по формуле ниже:

$$E_{h_ext} = E_{ext} \cdot \cos \theta_z, \quad (2)$$

где θ_z – зенитный угол, E_{ext} – заатмосферная солнечная облучённость.

2.2. Общая горизонтальная облучённость

Общая горизонтальная облучённость (*GHI*, global horizontal irradiance) – это полное количество солнечного излучения на горизонтальной поверхности Земли на уровне моря. Она оказывает решающее влияние на работу ФЭ панелей и состоит из прямой нормальной облучённости (*DNI*, direct normal irradiance) и диффузной горизонтальной облучённости (*DHI*, diffuse horizontal irradiance). Для определения *GHI* обычно используется пиранометр, который имеет полусферический (180°) угол обзора. Для вычислений *GHI* используется модель Кастена:

$$GHI = C_{g1,8} \cdot E_{ext} \cdot \cos \theta_z \times \exp(-C_{g2} \cdot AM \cdot (f_{h1} + f_{h2}(TL - 1)) + 0,01 \cdot AM^{1,8}), \quad (3)$$

где TL – это мутность Линке, равная 2 в этом случае,

$$C_{g1} = 5,09 \cdot e^{-5h} + 0,868, \quad (4)$$

$$C_{g2} = 3,92 \cdot e^{-5h} + 0,0387, \quad (5)$$

$$f_{h1} = e^{(-h/8000)}, \quad f_{h2} = e^{(-h/1250)},$$

$$\cos \theta_z = \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos w + \sin \lambda \cdot \sin \delta, \quad (6)$$

$$\delta = \arcsin(\sin(23,45^\circ) \cdot \sin(360(d - 81)/365)), \quad (7)$$

$$w = 15 \cdot (SolarTime - 12), \quad (8)$$

$$SolarTime = ClockTime + (L_{std} - L_{oc})/15 + E, \quad (9)$$

$$E = 0,165 \cdot \sin 2B - 0,126 \cdot \cos B - 0,0025 \cdot \sin B, \quad (10)$$

где $B = 360 \cdot (n - 1)/364$, n – номер дня по юлианскому календарю, λ – широта расположения, h – высота расположения в футах, δ – угол наклона, w – часовой угол, d – номер дня в году, L_{std} – стандартный меридиан местного часового пояса, L_{oc} – фактическая долгота местоположения.

Оптическая толщина земной атмосферы может быть представлена воздушной массой, которая определяется следующим образом:

$$AirMass \equiv AM = \frac{1}{\cos \theta_z}. \quad (11)$$

Воздушная масса равная 1 означает, что Солнце в зените.

2.3. Модель прямой облучённости горизонтальной и наклонной плоскостей

Прямую облучённость горизонтальной E_{bh} и наклонной плоскости I_b можно вычислить по [12]:

$$E_{bh} = E_n \cdot \cos \theta_z, \quad (12)$$

$$I_b = E_n \cdot \cos a, \quad (13)$$

где E_n – облучённость прямыми лучами Солнца плоскости по нормали, a – угол падения излучения

$$a = \arccos(\sin \theta_{sun} \sin \beta \cdot \cos(\gamma - \gamma_{sun}) + \cos \theta_{sun} \cdot \cos \beta), \quad (14)$$

$$\gamma_{sun} = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cdot \cos \lambda - \sin \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos w}{\cos(90 - \theta_z)}\right), \quad (15)$$

где γ_{sun} – азимут Солнца, θ_{sun} – зенитный угол Солнца, γ – азимут панели, β – угол наклона панели (см. рис. 2).

2.4. Модель нормальной облучённости прямыми лучами Солнца

Нормальная облучённость прямыми лучами Солнца – это общее количество солнечного излучения, приходящееся на единицу площади плоской поверхности, располо-

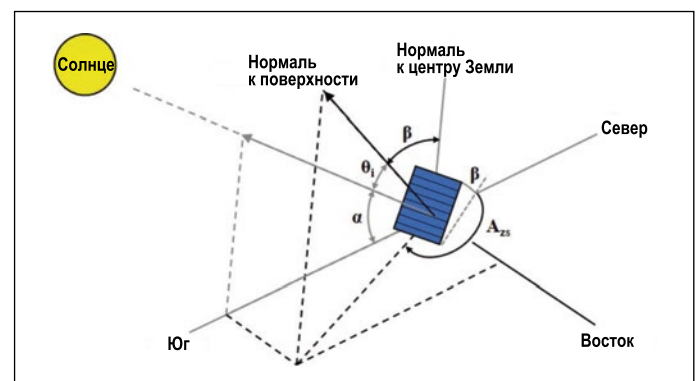


Рис. 2. Углы наклона панели, зенита, азимута и падения

женной перпендикулярно солнечным лучам. Пиргелио-метр обычно используется для измерения DNI . Он также может быть рассчитан с помощью модели кода моделирования прямой солнечной облучённости ($DISC$, *Direct Insolation Simulation Code*) [13] как

$$E_n = K_n \cdot E_{ext}, \quad (16)$$

$$\Delta K_n = K_{nc} - K_n, \quad (17)$$

где K_n – коэффициент пропускания атмосферой прямых (нерассеянных) лучей Солнца, E_{ext} – заатмосферная солнечная облучённость, K_{nc} – коэффициент максимального пропускания модели ясного неба, ΔK_n – отличие коэффициента пропускания атмосферы от своего максимального значения.

Для расчёта значения K_{nc} используется модель *Clear Bird* [14]:

$$K_{nc} = 0,866 - 0,122AM + 0,0121AM^2 + 0,000653AM^3 + 0,000014AM^4. \quad (18)$$

Для вычисления ΔK_n используется регрессионный анализ расчёта методом наименьших квадратов

$$\Delta K_n = a + b \cdot e^{c \cdot AM}. \quad (19)$$

Коэффициенты a , b и c могут быть определены, только если известно значение ясности неба K_t [15], которое сильно зависит от облачного покрова:

$$K_t = \frac{GHI}{E_{h_ext}}. \quad (20)$$

Если $K_t < 0,60$ (облачные условия), то

$$a = 0,512 - 1,56 \cdot K_t + 2,286 \cdot K_t^2 - 2,222 \cdot K_t^3,$$

$$b = 0,370 + 0,962 \cdot K_t,$$

$$c = -0,280 + 0,932 \cdot K_t - 2,046 \cdot K_t^2.$$

Если $K_t > 0,60$ (в основном ясные условия), то

$$a = -5,743 + 21,77 \cdot K_t - 27,49 \cdot K_t^2 + 11,56 \cdot K_t^3,$$

$$b = 41,40 - 118,5 \cdot K_t + 66,05 \cdot K_t^2 + 31,90 \cdot K_t^3,$$

$$c = -47,01 + 184,2 \cdot K_t - 222,0 \cdot K_t^2 + 73,81 \cdot K_t^3.$$

Как только ΔK_n и K_{nc} известны, то можно легко вычислить E_n и прямую облучённость излучения, падающего на наклонную плоскость $I_b = E_n \cdot \cos a$.

2.5. Модель диффузного излучения

Диффузная горизонтальная облучённость (DHI) – это диффузное или рассеянное излучение от атмосферы, падающее на горизонтальную плоскость. Значение DHI обычно измеряется с помощью пиранометра, однако в данном случае прямой солнечный свет заблокирован для устранения прямой составляющей излучения.

Диффузная облучённость наклонной поверхности бывает следующих видов:

- изотропное диффузное излучение;
- околосолнечное излучение;
- свечение горизонта.

Модель Клюхера [16] охватывает все три вышеупомянутых параметра. Таким образом, вычисляемая диффузная облучённость для наклонной плоскости имеет следующий вид:

$$I_{d,sky} = I_d \cdot [(1 - A_l) \cdot ((1 + \cos(\beta)) / 2) \cdot 1 + F \cdot \sin^3(\beta / 2) + A_l \cdot R_b], \quad (21)$$

где I_d – почасовая составляющая горизонтальной диффузной облучённости, а коэффициенты R_b , A_l , F определяются по формулам ниже:

$$R_b = \frac{I_b}{E_{bh}}, \quad A_l = \frac{E_{bh}}{E_{h_ext}}, \quad F = \frac{E_{bh}}{GHI}.$$

2.6. Модель отражённого поверхностью Земли излучения

Согласно предположению Луи и Джордана [17], постоянный коэффициент альбедо можно добавить к значению общей горизонтальной облучённости (GHI) для представления отражённой от Земли облучённости на солнечной панели.

$$R_h = 0,2 \cdot G_h. \quad (22)$$

2.7. Модель общей интенсивности падающих солнечных лучей на плоскость солнечной панели

Основным этапом при вычислении эффективности солнечной панели является определение общей интенсивности падающих солнечных лучей на плоскость солнечной панели (POA , plane of the array) как функции времени. Такое излучение зависит от нескольких факторов, в том числе направленности падающих лучей: диффузных и отражённых от поверхности Земли. Эти факторы учитываются с помощью алгоритма Переса [18]:

$$I_{poa} = I_{d,sky} + I_{d,ground}, \quad (23)$$

где $I_{d,sky}$ – вычисленное значение диффузной облучённости наклонной плоскости, а $I_{d,ground} = 0,2$ по определению.

2.8. Модель интенсивности падающих лучей на поверхность солнечного модуля

Учитывая общую интенсивность излучения POA , падающего на верхнюю поверхность солнечной панели, разработанное программное обеспечение *PV Watts* применяет поправку на угол падения (AOI , angle of incidence) для регулировки интенсивности излучения прямого луча при углах падения более 50° с учётом потерь на отражение. Для коррекции используется многочленная модель коррекции представления ФЭ-матрицы *Sandia* с коэффициентами для стекла.

Модель интенсивности падающих лучей на поверхность модуля может быть представлена в виде:

$$I_{tr} = I_{poa} - (1 - f) \cdot E_n \cdot \cos(a), \quad (25)$$

где E_n – облучённость прямыми лучами Солнца плоскости по нормали, a – угол падения излучения, I_{poa} – интен-

Обоснование выбора моделей исследования

Модель	Цель	Причина
Модель Кастена	GHI	Факторы окружающей среды, например воздушная масса (AM) и мутность по Линке (в т.ч. аэрозоли, поглощение из-за различных газов и рассеяние Рэлея), а также зависящие от местоположения параметры, например, зенитный угол (z), высота над уровнем моря (h)
DISC	DNI	Воздушная масса, облачный покров, альbedo, заметные водяные пары и атмосферная мутность (пыль, дым и капли воды)
Модель Клюхера	Виды диффузного излучения	Изотропное диффузное излучение, околосолнечное излучение и свечение горизонта
Алгоритм Переса	Модель общей интенсивности падающих солнечных лучей на плоскость солнечной панели (поверхности модуля)	Объединяет направленное, рассеянное и отражённое от поверхности Земли излучение
Вычисление мощности	Выходная мощность	Включает все параметры солнечной панели

сивность падающих лучей на плоскость солнечной панели, а коэффициент f рассчитывается по формуле ниже

$$f = b_0 + b_1 \cdot a + b_2 \cdot a^2 + b_3 \cdot a^3 + b_4 \cdot a^4 + b_5 \cdot a^5, \quad (24)$$

где многочленные коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 и b_5 относятся к параметрам модуля (b_n) и определяются для стекла.

2.9. Модель вычисления мощности

Модуль расчёта электроэнергии был приближён к вычислительному модулю версии *PVFORM*, которая стала прототипом разработанного программного обеспечения *PV watts* [19]. Мощность постоянного тока, протекающего через матрицу солнечной панели, рассчитывается путём сложения номинальной мощности панели, значения интенсивности излучения на плоскости солнечной панели и температуры ячеек.

$$P_{dc} = \frac{I_{tr}}{1000} \cdot P_{dc0} \cdot (1 + \gamma \cdot (T_{cell} - T_{ref})), \text{ если } I_{tr} > 125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \quad (26)$$

$$P_{dc} = \frac{0,008 \cdot I_{tr}^2}{1000} \cdot P_{dc0} \cdot (1 + \gamma \cdot (T_{cell} - T_{ref})), \text{ если } I_{tr} < 125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

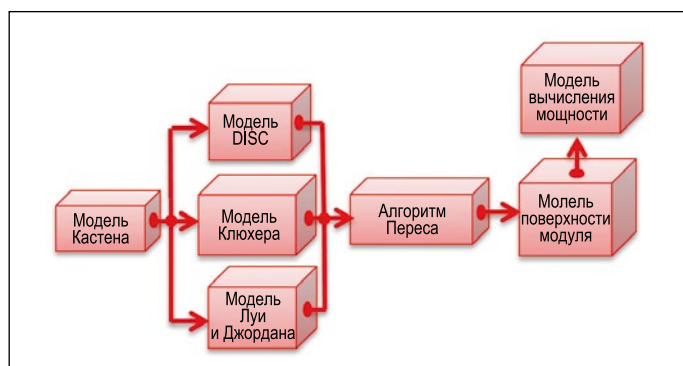


Рис. 3. Блок-схема процесса моделирования

$$I_{tr} < 125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (27)$$

где коэффициенты температуры γ зафиксированы на уровне $-0,5\%$ на 1°C , принятые для фотоэлектрического модуля на кристаллическом кремнии, $T_{ref} = 25^\circ$, T_{cell} – температура ячеек в градусах, P_{dc0} – это номинальная мощность модуля 250 Вт.

2.10. Блок-схема процесса моделирования

В параграфе на рис. 3 представлена структурная пошаговая схема расчёта выходной мощности с момента получения пользовательской информации (ввода данных). Каждый блок схемы обладает своим собственным расчётным алгоритмом, описанным выше для каждой из расчётных моделей.

3. Инструмент для выбора моделей и фактической реализации

В табл. 1 приводятся обоснование выбора моделей для реализации. Весь процесс происходит в *MATLAB*. Интерфейс разработанного программного обеспечения представлен на рис. 4.

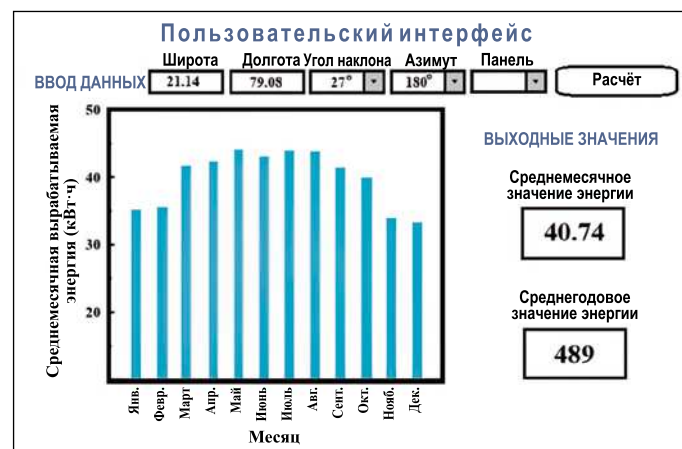


Рис. 4. Интерфейс системы

Средние расчётные и фактические значения электроэнергии

Месяц	Расчётное среднее значение энергии (кВт·ч)	Фактическое среднее значение энергии (кВт·ч)
Январь	40,4	41,7
Февраль	38,1	38,5
Март	44,0	43,8
Апрель	42,2	39,6
Май	41,3	38
Июнь	38,1	32,3
Июль	40,2	30,2
Август	42	30,2
Сентябрь	42	36,5
Октябрь	44,1	41,7
Ноябрь	37,4	39,6
Декабрь	37	39,6

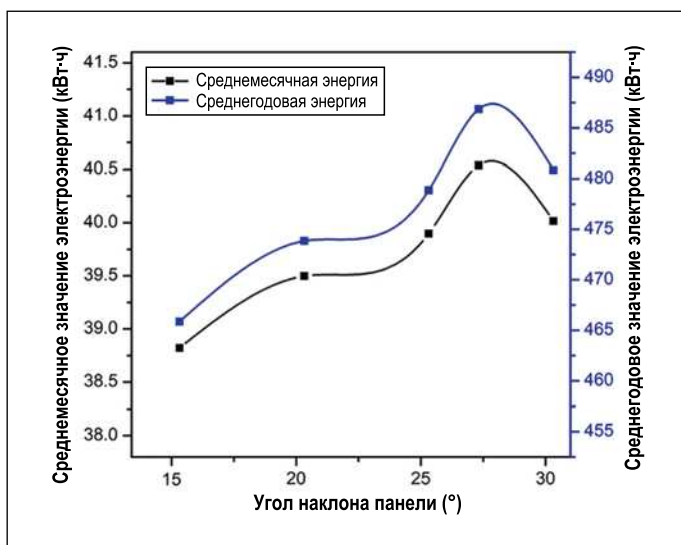


Рис. 5. Среднемесячное и среднегодовое значения энергии для переменного угла наклона панели

4. Обсуждение результатов

В настоящей работе результат получен путём фиксации азимута панели на уровне 180° при переменном угле наклона панели. На рис. 5 среднемесячное и среднегодовое значения электроэнергии суммируются со значением переменного угла наклона панели при фиксированном азимутальном угле панели 180° , обращённой к югу, тем самым формируя её графическое представление.

4.1. Сравнение значений вычисленной и фактической электроэнергии

В этом разделе проводится сравнение результатов расчёта, полученных с использованием рекомендуемого в этой работе программного обеспечения, с фактическими данными (<http://pvwatts.nrel.gov/India/pvwatts.php>). Ниже приводятся технические характеристики (пользовательские данные), которые вводились во время эксперимента:

Местоположение: Нагпур, Индия

Широта: $21,14^\circ$ N

Долгота: $79,08^\circ$ E

Угол наклона панели: 27°

Азимутальный угол панели: 180°



Рис. 6. Расчётное и фактическое среднегодовые значения энергии для панели с оптимальным углом наклона 27°

В табл. 2 приводится сравнение расчётных и фактических среднемесячных и среднегодовых значений электроэнергии с оптимальным углом наклона панели, составляющим 27° с фиксированным азимутальным углом обращённой к югу панели 180° . На рис. 6 приводится графическое сравнение расчётных и фактических значений среднегодовой энергии.

Разница между расчётными и фактическими значениями выделяемой электроэнергии немного больше в июле, августе и сентябре. Это обусловлено сезоном муссонов, длящимся с июля по сентябрь.

5. Заключение

Целью данной работы являлось вычисление оптимального угла наклона солнечной панели для получения максимального количества вырабатываемой электроэнергии в месяц и в год для любого местоположения. Выбранные модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей на плоскость солнечной панели включают в себя различные параметры местоположения, окружающей среды и зависимые параметры рассматриваемого модуля (250 Вт). Оценка проводилась путём сравнения значений фактически выделенной электроэнергии и расчётных значений для местоположения Нагпур (Индия) ($21,14^\circ$ с.ш., $79,08^\circ$ в.д.) при наклоне 27° . Было обнаружено, что разница между фактическими и расчётными значениями полученной электроэнергии составляет всего 0,35%. Следовательно, угол 27° является оптимальным углом наклона для обращённой к югу панели для генерации максимального количества электроэнергии. Результаты данной работы позволяют сделать вывод, что для получения данных о солнечном излучении можно использовать модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей, благодаря тому, что они хорошо изучены и

просты в обращении, а также нет необходимости установки дорогостоящих датчиков, например, пиранометров и пиргелиометров.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Корейского института оценки и планирования энергетических технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Schiermeier Q, Tollefson J, Scully T, Witze A, Morton O. Energy alternatives: Electricity without carbon. // *Nature News*. 2008 Aug 13;454 (7206):816–23.
2. Ulfat I, Javed F, Abbasi FA, Kanwal F, Usman A, Jahangir M, Ahmed F. Estimation of solar energy potential for Islamabad, Pakistan. // *InTerragreen 2012: Clean Energy Solutions for Sustainable Environment (CESSE) 2012 (Vol. 18, pp. 1496–1500)*. Elsevier.
3. Li DH, Lam JC. Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications. // *Renewable energy*. 2000 Aug 1;20(4):389–404.
4. Xu CY, Singh VP. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. // *Hydrological processes*. 1998 Mar 15;12(3):429–42.
5. Ineichen P, Guisan O, Perez R. Ground-reflected radiation and albedo. // *Solar Energy*. 1990 Jan 1;44(4):207–14.
6. Yu C, Khoo YS, Chai J, Han S, Yao J. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Japan. // *Sustainability*. 2019 Jan;11(7):2016.
7. Khoo YS, Nobre A, Malhotra R, Yang D, Rütther R, Reindl T, Aberle AG. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Singapore. // *IEEE Journal of photovoltaics*. 2013 Dec 12;4(2):647–53.
8. Benganem M. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. // *Applied Energy*. 2011 Apr 1;88 (4):1427–33.
9. Skeiker K. Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria. // *Energy Conversion and Management*. 2009 Sep 1;50 (9):2439–48.
10. Noia M, Ratto CF, Festa R. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. // *Solar Energy*. 1993 Dec 1;51 (6):449–56.
11. Ineichen P, Perez R. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. // *Solar Energy*. 2002 Sep 1;73(3):151–7.
12. Duffie JA, and Beckman WA, 2006. *Solar engineering of thermal processes*, America.
13. Marion B. A model for deriving the direct normal and diffuse horizontal irradiance from the global tilted irradiance. // *Solar Energy*. 2015 Dec 1; 122:1037–46.
14. Reno MJ, Hansen CW, Stein JS. Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis. // SANDIA report SAND2012–2389. 2012 Mar.
15. Mellit A, Kalogirou SA, Shaari S, Salhi H, Arab AH. Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone PV system. // *Renewable Energy*. 2008 Jul 1;33(7):1570–90.
16. Klucher TM. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. // *Solar energy*. 1979 Jan 1;23(2):111–4.

17. Liu BY, Jordan RC. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the US, its outlying possessions and Canada. // *Solar energy*. 1963 Apr 1;7(2):53–74.

18. Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. // *Solar energy*. 1990;44(5):271–89.

19. Menicucci DF, Fernandez JP. Users manual for PVFORM: A photovoltaic system simulation program for stand-alone and grid-interactive applications. // Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States); 1989 Oct 1.



Мухаммад Алим Захид (Muhammad Aleem Zahid), М. Sc. Родился в Равалпинди, Пакистан, в 1990 году. Он получил степень бакалавра и магистра в области электротехники в Инженерно-Технологический Университете Таксилы, Пакистан, в 2012 и 2016 годах. Он занимается кандидатской диссертацией по электротехнике в Университете Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. Область интересов – фотоэлектрические модули и технологии солнечных батарей



Ганеш Т. Чаван (Ganesh T. Chavan), М. Sc., Ph.D. Получил степень магистра в 2014 году и степень кандидата наук в Университете Солапура (Солапур, Индия) в 2017 году по специальности в области материаловедения. Он является соискателем на степень Ph.D. в Университете Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. В настоящее время его научные интересы включают кремниевые гетеропереходные солнечные элементы, двусторонние солнечные

элементы, различные типы светопрозрачных проводящих оксидов для солнечных элементов, генерацию солнечной энергии в водород и применение суперконденсаторов



Янг Хюн Чо (Young Hyun Cho), Ph.D. Получил степень бакалавра и магистра по электротехнике в Университете Ханьян и Университете Нового Южного Уэльса в 1987 и 1994 годах соответственно, а также степень доктора философии по фотоэлектрической инженерии в Университете Нового Южного Уэльса в 2009 году. Он является профессором-исследователем Университета Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. Он является вице-президентом

Комитета Корейского Фотоэлектрического Общества



Джунсин Ы (Junsin Yi), Ph.D. Родился в Сеуле, Корея, в 1962 году. В 1989 году он получил степень бакалавра в области электроники и электротехники в Корейском Университете Сунгкюнкван. Он получил степень магистра и доктора наук в области электроники и электротехники в Государственном Университете Нью-Йорка, Университете Буффало, США в 1991 и 1994 годах соответственно, в настоящее время он работает профессором в Университете

Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. Его основной научный интерес – солнечные элементы и тонкопленочный транзистор