

УДК 621.383/472

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

¹Пенджиев А.М., ²Астанов Н.Г.

¹*Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, Ашхабад, e-mail: ampenjiev@rambler.ru*

²*Атамурадскогорай ОНО, Туркменистан*

В статье приводятся результаты расчетов математической модели (теоретические) и экспериментальных исследований вольт-амперной и ватт-амперной характеристики режимов работы солнечной мобильной фотоэлектрической станции в зависимости от внутренних и внешних факторов, степени ориентации на Солнце в аридной среде Туркменистана.

Ключевые слова: солнечная мобильная станция, фотоэлектрический преобразователь, математическая модель, системы слежения за Солнцем, вольт и ваттные амперные характеристики, Туркменистан

PILOT STUDY OF THE MOBILE SOLAR PHOTO-ELECTRIC STATION

¹Penjiyev A.M., ²Astanov N.G.

¹*Turkmen State Institute of Architecture and Construction, Ashabad, e-mail: ampenjiev@rambler.ru,*

²*Expert of Atamuradsky regional department of national education of Lebapsky area of Turkmenistan*

In article the volt-ampere and watt-ampere of the characteristic of operating modes of solar mobile photo-electric station depending on internal and external factors, degrees of orientation to the Sun in the arid environment of Turkmenistan is resulted results of calculations of mathematical model (theoretical) both experimental researches.

Keywords: solar mobile station, the photo-electric converter, mathematical model, systems of tracking the Sun, volt and watt of amperes of the characteristic, Turkmenistan

В своем обращении Президента Туркменистана Гурбангулы Бердымухамедова к участникам Международной научной конференции «Инновационные технологии в использовании возобновляемых источников энергии» в декабре 2014 года сказал: «Туркменистан - государство, обладающее огромными запасами наземных и подземных богатств, углеводородных и горно-минеральных ресурсов, богатое на солнечную энергию и пустынный песок, имеющий в своем составе кремний. Наша главная задача - рациональное использование этих богатств, сохранение их для будущих поколений, производство из песка Каракумов и экспорт на мировые рынки кремния, являющегося базовым химическим элементом для создания оборудования, позволяющего получать экологически чистую электроэнергию» [1].

Для повышения эффективности и обеспечения наибольшего прихода солнечной радиации на рабочую поверхность существуют рекомендации по ориентации наземных стационарных солнечных установок (СУ) в зависимости от широты местности и времени года. Эффективность использования СУ можно повысить и применением систем слежения за Солнцем, которые позволяют увеличить выходную мощность ФЭП и дневной интервал генерирования электрической энергии. Существуют си-

стемы слежения за Солнцем с частичной (азимутальной) или полной (азимутальной и зенитальной) ориентацией [10-12].

Целесообразность их использования в СУ должно обосновываться проведением необходимых исследований и расчетов.

Исследования математической модели. Наиболее эффективным методом исследования СУ является имитационное моделирование, позволяющее по сравнению с натурными экспериментами учесть влияние на энергетические характеристики СУ большого числа параметров и сократить затраты времени и средств на проведение необходимых расчетов и исследований.

В основу математического моделирования была заложена классическая модель фотопреобразователя с p-n переходом [11]:

$$U = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[\frac{(J_{\phi} - J)}{J_0} + 1 \right] - JR, \quad (1)$$

где U - напряжение, В; k - постоянная Больцмана; T - рабочая температура ФЭП, К; q - заряд электрона; J_{ϕ} - фототок, пропорциональный интенсивности солнечного излучения I , падающего на поверхность ФЭП, ($J_{\phi}/I = const$) A/cm^2 ; J - ток, A/cm^2 ; J_0 - обратный ток насыщения, определяемый свойствами исходного полупроводника, определялся из выражения (1) при условии $J=0$ и $U=U_{xx}$, A/cm^2 ; R - внутреннее электрическое

сопротивление, Ом/см²; А - безразмерный параметр кривизны вольт-амперной характеристики (ВАХ), А = 1...2.

Для исследования режимов работы СУ с ФЭП была разработана математическая модель, реализованная в программной среде. В целях ее апробации построены вольт-амперная характеристика (ВАХ) и ватт-амперная характеристика (ВВХ), для модуля ФЭП состоящего из параллельно соединенных блоков при стандартных условиях освещения $AMI_0 = 1000$ Вт/м² и рабочей температуре. Фотоэлементы из монокристаллического кремния имеют следующие характеристики: $J = 2,74$ А/м²; $U_{oc} = 22$ В; $R = 10$ Ом·см²; площадь $S = 0,3792$ м². Фотоэлектрический модуль, по паспортным данным, выдает максимальную мощность $P_{max} = 49,4$ Вт, $U_{xx} = 20,6$ В, $I_{кз} = 2,4$ А, оптимальное рабочее напряжение $U_{opt} = 16,3$ В и ток $J_{opt} = 2,75$ А мощность $P_{opt} = 44,8$ Вт.

Как видно из рис. 1 (а), полученные теоретические расчеты вольт-амперных характеристик (ВАХ) математической модели совпадают с паспортными данными, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Однако реальные характеристики ФЭП значительно отличаются от стандартных, вследствие изменения параметров внешней среды (интенсивности солнечного излучения и температуры воздуха), которые зависят от географического положения предполагаемой эксплуатации установки, времени года, суток и степени ориентации СУ на Солнце.

Влияние изменения интенсивности солнечного излучения и рабочей температуры на ВАХ ФЭП, можно записать в виде выражений [5-9,11]:

$$J_{кз} = J_{о.кз} + \Delta J_I + \Delta J_T; \quad (2)$$

$$U_{xx} = U_{о.хх} + \Delta U_{II} + \Delta U_{I2} + \Delta U_T, \quad (3)$$

где $J_{о.кз}$ и $U_{о.хх}$ - исходный ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, измеренные при стандартных условиях освещения $AMI(I = 1000 \text{ Вт/м}^2)$ и рабочей температуре ($T = 25^\circ\text{C}$); ΔJ_I , ΔU_{II} , ΔU_{I2} - поправки, учитывающие изменение плотности потока солнечного излучения; ΔJ_T , ΔU_T - поправки, учитывающие изменение рабочей температуры:

$$\Delta J_I = \frac{I - I_0}{I_0} J_{о.кз}; \quad (4)$$

$$\Delta U_{II} = -\Delta J_I \cdot R_{II}; \quad (5)$$

$$\Delta U_{I2} = \kappa \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right); \quad (6)$$

$$\Delta J_T = \beta_I \cdot J_{о.кз} (T - T_0); \quad (7)$$

$$\Delta U_T = \beta_U \cdot U_{xx} (T - T_0), \quad (8)$$

где R_{II} - последовательное сопротивление элемента; κ - коэффициент, зависящий от типа солнечного элемента, $0,5 \leq \kappa \leq 1,5$ [2]; β_I , β_U - температурные коэффициенты тока и напряжения, 1/°С.

При определении интенсивности солнечной радиации (прямой, рассеянной и суммарной) на горизонтальную поверхность при математическом моделировании использовались данные многолетних наблюдений [13]. Для исключения интервалов, интенсивности в которых не известны, использовался метод полиномиальной аппроксимации [2-7,11,12].

Суммарная интенсивность солнечного излучения на стационарную наклонную поверхность, ориентированную на юг была рассчитана по выражению [10-12]:

$$I_H = I_{II} \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + I_D \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho (I_{II} + I_D) \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (9)$$

где I_{II} , I_D - интенсивностью прямого и рассеянного (диффузного) солнечного излучения на горизонтальную поверхность, Вт/м²; θ - угол между направлениями на Солнце и зенит в град., определяется по формуле (10); ξ - угол между направлением на Солнце и нормалью к наклонной поверхности, ориентированной на юг в град. определяется по формуле (11); β - угол наклона рассматриваемой поверхности к горизонту в град.; ρ - коэффициент отражения (альбедо) поверхности Земли и окружающих тел [11].

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega, \quad (10)$$

$$\cos \xi = \sin(\phi - \beta) \sin \delta + \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega, \quad (11)$$

где δ - склонение Солнца, определяется по формуле Купера в град [1], ϕ - широта местности, в град.; ω - часовой угол движения Солнца, в град.

Часовой угол рассчитывался по формуле [5]:

$$\omega = (15^\circ \text{ час}^{-1}) (t_{solar} - 12), \quad (12)$$

где t_{solar} - локальное солнечное время в часах.

Расчет суммарной интенсивности солнечного излучения на приемник, расположенный под углом β и ориентирующийся на Солнце только по одной координате (азиму-

тальное слежение) производился по формуле (9), с разницей в нахождении угла между направлением на Солнце и нормалью (вместо ξ используется i). Данный угол определялся по формуле [8-11]:

$$\cos i = \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cos a_{\Pi} \cos \omega + \sin a_{\Pi} \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos a_{\Pi}] + \cos \beta [\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi]. \quad (13)$$

где a_{Π} - азимут приемника.

При слежении за Солнцем по азимуту, азимут приемника равен азимуту Солнца ($a_n = a$) и определялся по формуле [6-11]:

$$a = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \varphi}{\cos \alpha}\right), \quad (14)$$

где α - угол высоты Солнца, определялся по формуле:

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \Rightarrow \alpha = \arcsin(\cos \theta). \quad (15)$$

Суммарная интенсивность солнечного излучения при полной ориентации поверхности была рассчитана по выражению [1]:

$$I_{op} = \frac{I_{\Pi}}{\cos \theta} + I_{д} \frac{(1 + \cos \theta)}{2} + \rho(I_{\Pi} + I_{д}) \frac{1 - \cos \theta}{2}. \quad (16)$$

Для расчета температуры окружающего воздуха были привлечены ежечасные данные по температуре окружающего воздуха, приведенные в справочнике [13] и применялась аналитическая зависимость изменения температуры воздуха в течение времени, учитывающая среднесуточную, суточную амплитуду, период изменения температуры воздуха [7-12].

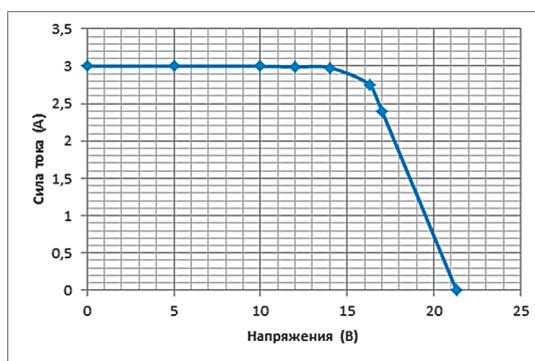
Все вышеприведенные выражения были учтены в разработанной математической модели. На рисунке 1 приведены результаты теоретических расчетов на основе математической модели вольт-амперной характеристики (ВАХ) и ватт-амперная характеристика (ВВХ) ФЭП:

Результаты экспериментальных исследований. Нами разработана мобильная солнечная фотоэлектрическая станция, представляющая в виде чемодана (дипломата) встроены с одной стороны фотоэлектрический модуль, с другой стороны встроены принадлежащие к станции оборудования (инвентарь, аккумулятор, угломер и ножки для крепления станции). Исследования мобильной станции проведены в дайханском объединений ХатабАтамыратскогоэтрапа (района) Лебапскоговелаята (области) Юго-Восточного

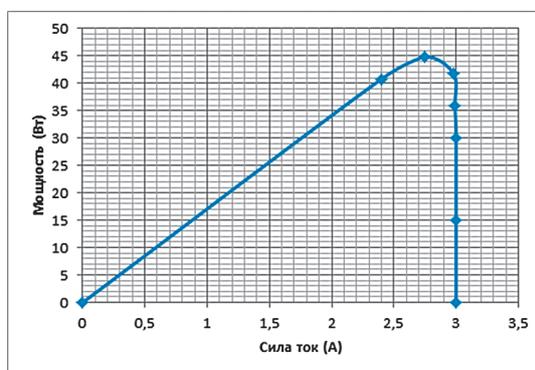
Туркменистан находящийся: 38° северной широты; 53° восточной долготы. Экспериментальные исследования проведены

в двух режимах: станция ориентирована на юг с изменением угла наклона; станция ориентирована на юг с изменением угла наклона и слежения за солнцем. Результаты экспериментальных вольт, ватт-амперных

характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, без слежения стандартной с ориентацией на юг под углом к горизонту 60°, со слежением азимутальным под углом к горизонту 60°, ориентацией слежения за солнцем, 18 мая 2015 года в 10 часов, приведены на таблице 1 и рис. 2.



а - ВАХ



б - ВВХ

Рис. 1. Характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, стандартных без слежения с ориентацией на Юг: а - ВАХ 21 мая в 10 часов; б - ВВХ

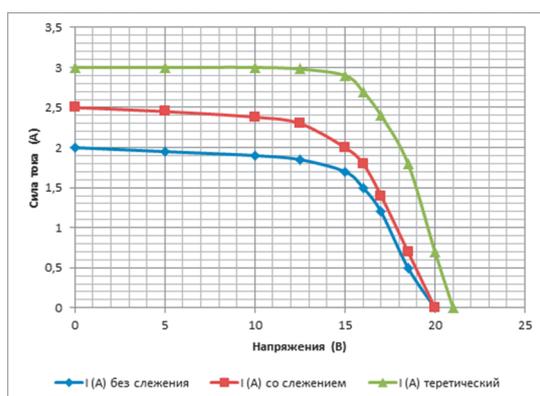
Регрессивная зависимость и коэффициент корреляционная при теоретических расчетах на основе математической модели мобильной станции фотоэлектрической станции:

вольт-амперной характеристикиравна: $y = -0,1127x + 3,7694$; $R^2 = 0,4961$;
вольт-ваттная характеристика: $y = 10,022x + 8,551$; $R^2 = 0,3486$.

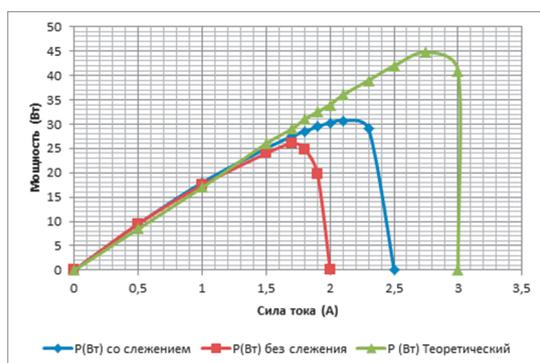
Таблица 1

Теоретических расчетов фотоэлектрического модуля и экспериментальные исследования со слежением и без нее.

| Энергетические параметры | Теоретические расчеты | Со слежением | Без слежения |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| R - Солнечная радиация Вт/ кв.м | 1094,891 | 912,4088 | 729,927 |
| I _{кз} - Сила тока (А) | 3 | 2,5 | 2 |
| U _{хх} - Напряжения (В) | 21,2 | 21,1 | 20 |
| I _{опт} - Сила тока (А) | 2,7 | 2 | 1,5 |
| U _{опт} – Напряжения (В) | 16,5 | 15 | 15 |
| P _{опт} – мощность (Вт) | 44,55 | 30 | 22,5 |
| η- КПД (%) | 15,41753 | 15,3448 | 14,54484 |



а – ВАХ



б – ВВХ

Рис. 2. Характеристики модуля ФЭП при теоретических расчетах, без слежения стандартной с азимутальной ориентацией на Юг под углом к горизонту 60° , со слежением за солнцем: а – ВАХ 18 мая в 10 часов; б – ВВХ

Регрессивная зависимость и коэффициент корреляционной при экспериментальных исследованиях мобильной станции фотоэлектрической станции:

ВАХ теоретический $y = -0,104x + 3,0434$; $R^2 = 0,6203$;

ВАХ со слежением за солнцем: $y = 0,0818x + 2,4356$; $R^2 = 0,5804$;

ВВХ без слежения за солнцем ориентированной на юг: $y = 7,1586x + 5,8938$; $R^2 = 0,2361$;

ВВХ со слежением за солнцем с поворотом на 60 градусов: $y = 7,9471x + 8,2286$; $R^2 = 0,2599$.

Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение. Результаты моделирования работы модуля ФЭП, характеристики которого приведены выше, для климатических условий юго-восточных районов Туркменистана ($\phi = 38^\circ$), в 10 ч локального солнечного времени 18 мая представлены на рис. 2. Анализ показывает, что выходная мощность модуля ФЭП с системой слежения за Солнцем в указанное время значительно больше мощности стационарного. Полная ориентация модуля на Солнце дает практически те же характеристики, что и при частичной (азимутальной) ориентации. Следовательно, проведение подобного сравнительного моделирования для круглогодичного периода позволит дать оценку о целесообразности применения систем автоматизированного слежения в СУ с ФЭП.

Выводы. Математическая модель позволяет оценить влияние на выходные характеристики модуля ФЭП, как внутренних (число последовательно, параллельно соединенных элементов, внутреннего сопротивления), так и внешних факторов (интенсивности солнечного излучения, температуры воздуха, степени ориентации модуля ФЭП на Солнце в зависимости от времени года и суток).

Сравнение полученных при моделировании значений интенсивности солнечного излучения с данными, приведенными в таблице 1 и рис. 1 показало, что погрешность не превышает 12%, а температуры окружающего воздуха с данными, приведенными в справочнике по климату - 5%. Сопоставление значений $J_{0,кз}$, $U_{0,хх}$, P та же полученные при моделировании со значениями, приведенными в паспортных данных модуля ФЭП, подтверждает адекватность разработанной модели. Со слежением мощность и сила тока увеличивается на 15 %, естественно и КПД увеличивается на 1% в 10 часов утра.

Математическую модель можно использовать для оценки целесообразности применения систем автоматического слежения в СУ с ФЭП.

Список литературы.

1. Бердымухамедов Г.М. Государственное регулирование социально-экономического развития Туркменистана. Том 1. А.: Туркменская государственная издательская служба, 2010.
2. Пенджиев А.М. Изменение климата и возможности уменьшения антропогенных нагрузок. Монография. LAMBERT Academic Publishing, 2012
3. Пенджиев А.М. Экологические проблемы освоения пустынь. Монография, Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing 2014, - 226 с. ISBN:978-3-8433-9325-6
4. Пенджиев А.М. Планирование развития фотоэнергетики в Туркменистане // Экологическое планирование и управление. 2007. № 4. С.
5. Пенджиев А.М. Ожидаемая эколого-экономическая эффективность использования фотоэлектрической станции в пустынной зоне Туркменистана // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2007. № 5. С. 135–137.
6. Пенджиев А.М., Астанов Н.Г., Пенджиев М.А.. Использование солнечно-энергетических установок в заповед-

ных зонах Туркменистана для улучшения аридной экосистемы //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 12 (104) 2011. С.26-32.

7. Пенджиев А.М.. Возобновляемая энергетика и экология (обобщение статей)//Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 08 (148) 2014. С. 45-78
8. Пенджиев А.М. Механизм чистого развития: приоритеты энергоэффективности в Туркменистане // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 10 (78) 2009с142-148
9. Пенджиев А.М. Перспективы альтернативной энергетики и ее экологический потенциал в Туркменистане. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 9 (77) 2009. С.131-139
10. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983.- 360 с.
11. Стребков Д.С., Пенджиев А.М., Мамедсахатов Б.Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. Монография. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012.
12. Использование солнечной энергии. Под редакцией профессора Рыбаковой Л.Е. Ашхабад: Ылым, 1985.
13. Научно - прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, ч.1-16, вып. 1-30, Л.: 1989, 502 с.