

Разработка системы слежения за солнцем и охлаждения фотоэлектрического модуля на основе нечеткой логики

Ле Винь Тханг

Национальный исследовательский университет «Московский Институт Электронной Техники»

Аннотация: В данной работе представлена концепция использования нечетких методов управления при построении энергоэффективных систем на основе фотоэлектрических модулей. Проведен анализ методов повышения эффективности для фотоэлектрических модулей в случае погожего солнечного дня. Результаты показывают, что эффективность предлагаемой системы увеличивается на 27,91%, 23,30% и 4,95% по сравнению с фотоэлектрическим модулем, соответственно, с системой фиксированного наклона, системой с водяным охлаждением и системой слежения за солнцем. Результаты моделирования могут служить предпосылкой для будущих экспериментальных моделей.

Ключевые слова: Фотоэлектрический модуль, термоэлектрическая модель, солнечное слежение, водяное охлаждение, эффективность, нечеткая логика.

1. Введение

На производительность фотоэлектрических модулей, в основном, влияет температура [1] и направление солнечного излучения относительно рабочей поверхности. Многие теоретические и практические исследования были проведены исследователями для повышения эффективности фотоэлектрических систем с использованием одноосных [2] или двухосевых систем слежения за солнцем [3]. Кроме того, испытания [4] показывают, что внедрение системы водяного охлаждения увеличивает выходную мощность фотоэлектрического модуля примерно на 3-5%.

В данной статье предлагается комбинированная система слежения за солнцем с водяным охлаждением для фотоэлектрического модуля. Для сложных процессов, которыми трудно управлять, следует использовать регуляторы с нечеткой логикой [5,6]. Нечеткий логический контроллер является адаптивным и нелинейным по своей природе, что обеспечивает высокую производительность при изменении входных параметров. Это исследование посвящено построению и моделированию нечеткого логического контроллера для предлагаемой системы.

2. Математическая модель

2.1 Модель системы слежения за солнцем

Суммарное солнечное излучение на наклонной поверхности можно рассчитать по формуле [7]:

$$G_t = G_d + G_g + G_b \quad (1)$$

Где G_b – освещенность луча, Вт/м²; G_g – отраженная от земли освещенность, Вт/м²; G_d – рассеянная по небу освещенность, Вт/м².

$$G_d = DNI \frac{1 + \cos \theta_T}{2}; \quad G_g = GHI \cdot \text{albedo} \cdot \frac{1 - \cos \theta_T}{2}; \quad G_b = DNI \cdot \cos(AOI) \quad (2)$$

Где DNI – диффузная горизонтальная освещенность, Вт/м²; θ_T – угол наклона поверхности фотоэлектрического модуля, град; GHI – глобальная горизонтальная освещенность, Вт/м²; albedo – альбеда земли (обычно равное 0,2); DNI – прямая нормальная освещенность, Вт/м²; AOI угол падения, град. AOI - это угол между лучом солнечного света и нормалью к поверхности фотоэлектрического модуля.

2.1 Тепловая модель фотоэлектрического модуля

Уравнение энергетического баланса [8]:

$$C_{PV} \frac{dT_{PV}}{dt} = G_t \cdot A_{PV} - q_{ref} - P_{MP} - q_{rad_s} - q_{rad_g} - q_{conv} - q_{sp} \quad (3)$$

Где C_{PV} – эквивалентная теплоемкость фотоэлектрического модуля, Дж/К; A_{PV} – площадь поверхности фотоэлектрического модуля, м²; T_{PV} – температура фотоэлектрического модуля, °С; G_t – солнечная радиация на поверхности фотоэлектрического модуля, Вт/м²; q_{ref} – отраженная солнечная радиация, Вт; P_{MP} – электрическая мощность фотоэлектрического модуля, Вт; q_{conv} – конвективный теплообмен между поверхностью фотоэлектрического модуля и воздухом, Вт; q_{rad_s} – радиационный теплообмен между фотоэлектрическим модулем и небом, Вт; q_{rad_g} – радиационная теплопередача между фотоэлектрическим модулем и землей, Вт; q_{sp} – конвективный теплообмен между фотоэлектрическим модулем и водяной струей, Вт.

2.3 Модель фотоэлектрической модульной системы поверхностного охлаждения

Поскольку это исследование имеет дело только с очень низким тепловым потоком и температурой, тепловые потери между струей воды и поверхностью фотоэлектрического модуля из-за брызг рассчитываются по формуле[9]:

$$\begin{aligned}q_{sp} &= A_{PV} h_w (T_{PV} - T_w) \\h_w &= Nu_{sp} \frac{k_w}{L_{PV}} \\ \xi &= \frac{T_{PV}}{T_{boiling} - T_{air}} \\ Nu_{sp} &= 7.144 Re_{sp}^{0.438} \xi^{0.9016} \\ Re_{sp} &= \frac{MF \cdot L_{PV}}{\mu_w} = \frac{MF_w \cdot \rho_w \cdot L_{PV}}{A_{PV} \cdot \mu_w}\end{aligned}\quad (4)$$

Где h_w - средний коэффициент теплопередачи между водяной струей и поверхностью фотоэлектрического модуля, Вт/м²К; Nu_{sp} - спрей число Нуссельта; k_w - теплопроводность воды, Вт/мК; L_{PV} - длина фотоэлектрического модуля, м; T_w - температура распыляемой воды, °С; ξ - безразмерная температура; $T_{boiling}$ - температура испарения воды, °С; Re_{sp} - распылить число Рейнольдса; MF - массовый поток воды на единицу площади поверхности целевой фотоэлектрического модуля, кг/м²с; μ_w - динамическая вязкость воды, Па.с; MF_w - массовый расход, м³/с; ρ_w - плотность воды, кг/м³.

2.4 Электрическая модель фотоэлектрического модуля

В целях упрощения модели, максимальная мощность фотоэлектрического модуля рассчитывается по уравнению [10]:

$$P_{MP}(G, T_c) = P_{MP_STC} \frac{G}{G_{STC}} [1 + \alpha_p \cdot (T_c - T_{STC})] \quad (5)$$

Где P_{MP_STC} - максимальная мощность при стандартных условиях испытаний, Вт; α_p - тепловой коэффициент мощности, %°С-1; G - суммарное солнечное излучение, попадающее на площадь поверхности солнечных элементов фотоэлектрических модулей, Вт/м², рассчитывается по формуле:

$$G = G_t \cdot \tau_g \quad (6)$$

Где τ_g - коэффициент пропускания защитного стекла фотоэлектрического модуля.

3. Методы управления предлагаемой системой

3.1 Метод управления системой слежения за солнцем

В исследовании предлагается метод нечеткого управления для управления линейным приводом (системой слежения за солнцем). Блок-схема контроллера с нечеткой логикой представлена на рис 1. Данные получены от двух световых сигналов датчика положения солнца через основной контроллер. Исходя из этих двух значений АЦП, анализируются рабочий порог ($АЦП_{\text{работа}} = АЦП_{\text{запад}} + АЦП_{\text{восток}}$), разностный порог ($АЦП = АЦП_{\text{запад}} - АЦП_{\text{восток}}$), и это будут два входных значения контроллера нечеткой логики в системе.

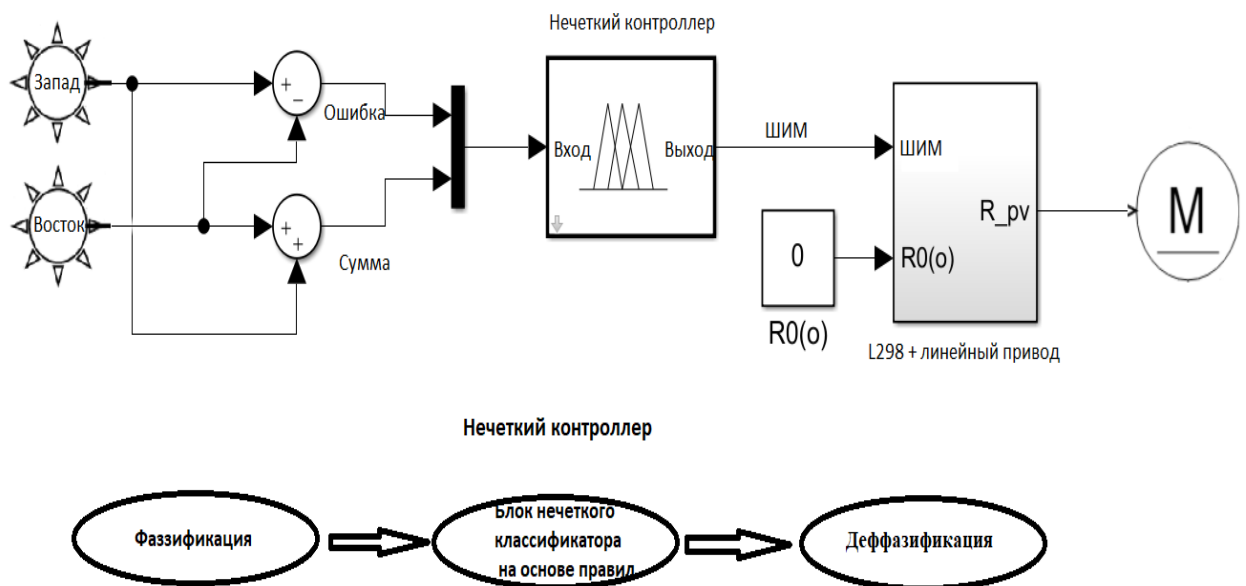


Рис. 1. – Блок-схема нечеткого управления для одноосевой системы слежения за солнцем

В работе используется система управления с нечеткой логикой Sugeno и модель треугольника считается подходящей в качестве функции принадлежности. Функции-члены и нечеткие системы управления создаются с помощью программы MATLAB. (рис 2).

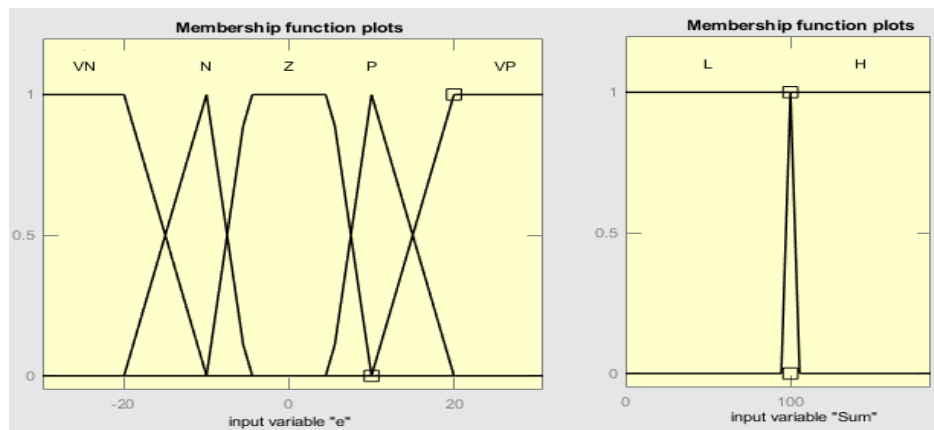


Рис. 2. – Входные функции принадлежности для управления системой слежения за солнцем

Сигнал АЦП, считанный с датчика солнечной батареи, имеет значение в диапазоне 0–1024 (для 10-битного микроконтроллера) и рассчитывается, как суммарное значение и значение ошибки. Выходные метки членства: 255, 200, 0, -200, -255. Отрицательные или положительные значения используются для регулировки направления вращения. Это значение представляет собой коэффициент обслуживания ШИМ (соответствует от 0 до 255 при использовании 10-битного микроконтроллера). Регулируется рабочий цикл и управление скоростью сигнала ШИМ, а также руководство по запуску. Отрицательные значения позволяют системе слежения за солнцем вращаться по часовой стрелке (то есть, с востока на запад), в противном случае, системы слежения за солнцем вращаются против часовой стрелки. Рабочий цикл регулируется путем выбора соответствующих значений компонентов для быстрого и медленного вращения системы.

Таблица № 1

Таблица правил нечеткого контроллера

Ошибка Сумма	Очень негативно	Отрицательный	Нуль	Позитивный	Очень позитивно
Низкий	255	0	0	0	-255
Высокий	255	200	0	-200	-255

3.2 Метод управления системой водяного охлаждения

Система водяного насоса управляется методом нечеткой логики. Данные T_{PV} получаются от датчика температуры (DS18B20) через главный контроллер. Это значение T_{PV} будет входным значением контроллера нечеткой логики в системе. Выходной сигнал представляет собой напряжение, подаваемое на двигатель насоса 0, 6, 10, 12 В. Это значение представляет собой отношение ШИМ (соответствует от 0 до 255 при использовании 10-битного микроконтроллера). Рабочий цикл и цикл управления ШИМ-сигнала регулируют скорость двигателя насоса при изменении выходной мощности.

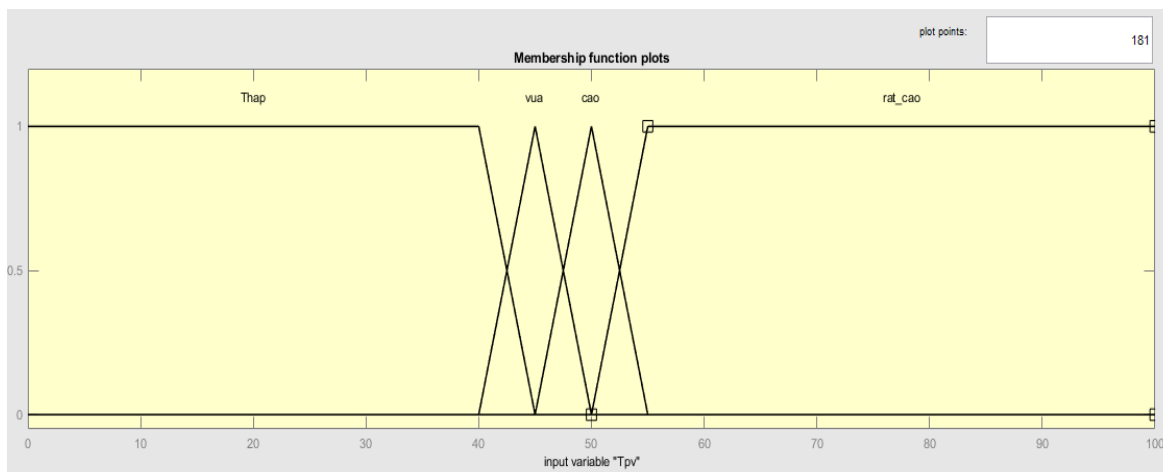


Рис. 3. – Входные функции принадлежности для управления системой водяного охлаждения

4. Моделирование

Модель системы моделируется с использованием программного обеспечения Matlab-simulink версии 2015 (рис 4).

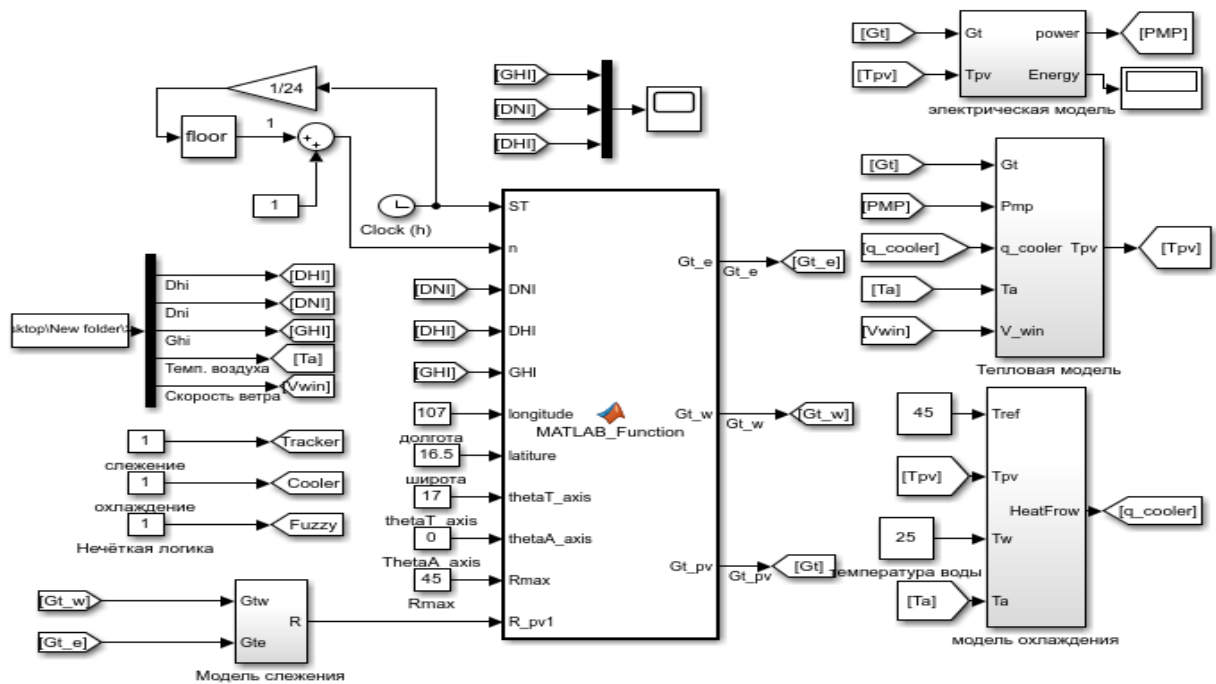


Рис. 4. – Имитационная модель предлагаемой системы

5. Результаты и обсуждение

Для проведения моделирования и оценки предложенной модели тепло-электричества фотоэлектрического модуля были использованы погодные параметры города Хюэ, Вьетнам, 2022 год от Solcast, включая: GHI, DNI, DHl, температуру воздуха и скорость ветра. На рис 5а приведены данные о погоде в солнечный день с малой облачностью в сухой сезон (19 июля 2022), это типичный летний день, максимальная температура воздуха достигает $35,5^{\circ}\text{C}$ в полдень и длится с 10:00 до 14:00ч (рис 5б). Суммарная солнечная радиация достигала наивысшего уровня: 965 Вт/м^2 , были времена, когда облачный покров влиял и уменьшал количество радиации.

Результаты показывают, что генерирующая мощность фотоэлектрических модулей, использующих систему слежения за солнцем (tracking), очень эффективна утром с 6:30 до 11:00 и днем с 13:00 до 17:00 (рис 6а). Эффективность увеличилась до 21,87% по сравнению с системой фиксированного наклона. В случае фотоэлектрических модулей, использующих систему охлаждения (cooling) с хорошей эффективностью, по

сравнению с системой с фиксированным наклоном (normal) между 9:30 и 14:30, эффективность увеличивается на 3,74%. Система слежения за солнцем в сочетании с охлаждением (tracking) одновременно обеспечивает два вышеупомянутых преимущества, поэтому она более эффективна, увеличивая эффективность до 27,91%. При использовании системы охлаждения и системы слежения за солнцем в сочетании с охлаждением, температура фотоэлектрического модуля в полдень колеблется в диапазоне от 46 до 56°C. Для фотоэлектрических модулей с фиксированным углом наклона температура в полдень составляет около 50-70°C (рис 6б).

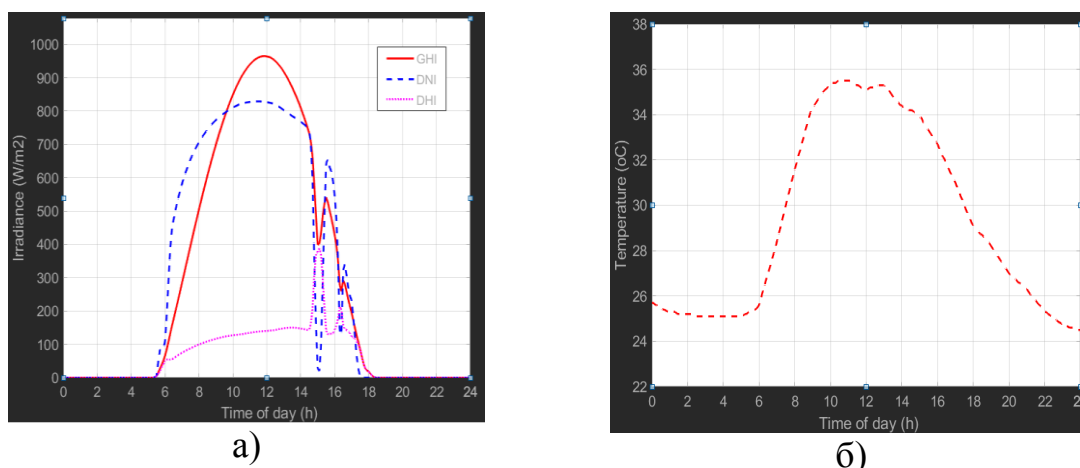


Рис. 5. – Данные о погоде в 19.07.2022 а) GHI, DNI, DHI; б) температура воздуха

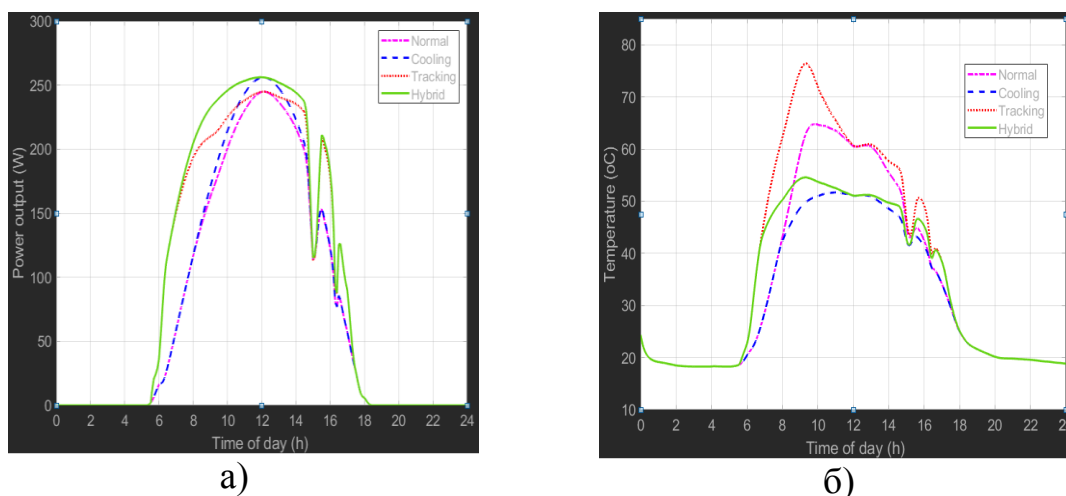


Рис. 6. – а) Выходная мощность и б) Температура фотоэлектрических модулей с использованием различных систем.

Таблица № 2

Сравнение выхода энергии модуля PV с разными системами в 19/7/2022

Системы	Hybrid	Tracker	Cooling	Normal
Энергия (Втч) производительности	2311,73	2202,63	1874,81	1807,29
Повышение производительности Hybrid систем по сравнению с другими системами, %	0	4,95	23,30	27,91

Таблица 2 показывает, что фотоэлектрический модуль, использующий систему слежения за солнцем в сочетании с системой охлаждения, обеспечивает повышение эффективности с 4,95%, 23,30% до 27,91% соответственно, по сравнению с фотоэлектрическими модулями, использующими систему слежения за солнцем, систему охлаждения и фиксированный угол наклона.

6. Заключение

В статье построена простая термоэлектрическая модель фотоэлектрического модуля в сочетании с системой слежения за солнцем и водяным охлаждением. Предлагаемая модель направлена на решение основной проблемы, влияющей на производительность солнечного модуля, а именно - на температуру и направление солнечного излучения относительно поверхности фотоэлектрического модуля. Результаты моделирования показывают, что в солнечный летний день с небольшой облачностью производительность предлагаемой системы значительно улучшилась по сравнению с другими системами, до 27,91% по сравнению с фиксированной системой. Результаты моделирования служат предпосылкой для будущих экспериментальных моделей. Чтобы лучше понять эффективность улучшения предлагаемой системы, необходимо провести эмпирические исследования с реальными моделями в разное время, а также в разных регионах.

Литература (References)

1. Nižetić Sandro, D Čoko, Yadav Ankit, Grubišić-Čabo Filip. Energy conversion and management, 2016, vol 108, pp 287-296.
2. Almarshoud A.F. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2016, vol 66, pp. 694-701.
3. Ontiveros Joel J., Ávalos Carlos D., Loza Faustino, Galán Néstor D., Rubio Guillermo J. International Journal of Photoenergy, 2020. Article ID 8813732, 13 pages. URL: doi.org/10.1155/2020/8813732
4. Shahverdian M.H, Sohani A, Sayyaadi H. Journal of Cleaner Production, 2021, vol 312, pp. 127641. URL: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127641
5. Takagi Tomohiro, Sugeno Michio Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132.
6. Le Vinh Thang, Schagin Anatolii, Zaw Myo Naing, Ngo Xuan Cuong, Le Dinh Hieu. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2021, pp.2696-2699.
7. Mousavi Maleki SA, Hizam H, Gomes C. Energies, 2017, vol 10 (1), pp.1-28.
8. da Silva VO, Martinez- Bolanos JR, Heideier RB, Gimenes ALV, Udaeta MEM, Saidel MA. IET Renewable Power Generation, 2021, vol 15(1), pp.206-224.
9. Wang Y, Liu M, Liu D, Xu K, Chen Y. Experimental Thermal Fluid Science, 2010, vol 34, issue 7, pp.933-42.
10. Marion Bill 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 2008, pp. 1-6.