

УДК 004:629.7.064.56(045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113

Анализ различных методов отслеживания точки максимальной мощности при работе солнечных фотоэлектрических систем

Л. М. Абдали, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Х. А. Исса, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

М. Н. Аль-Малики, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Использование систем управления для фотоэлектрических установок значительно повышает выработку электрической энергии и эффективность их использования. Солнечные системы электроснабжения сильно зависят от различных климатических факторов, и поэтому существует реальная необходимость использования систем автоматического регулирования их различных энергетических параметров, таких как сила тока, напряжение и мощность. Одной из перспективных систем контроля энергетических характеристик фотоэлектрических установок являются MPPT системы (системы контроля точек максимальной мощности). В статье исследуется влияние различных методов отслеживания точки максимальной мощности (MPPT), применяемых к фотоэлектрическим системам. В этой работе используются такие методы, как метод восхождения к вершине (НС), метод инкрементной проводимости (IC) и метод возмущения и наблюдения (P&O). Модель фотоэлектрического модуля и повышающего преобразователя постоянного тока с различными методами ТММ («теория машин и механизмов») была смоделирована с использованием программного обеспечения Matlab. Совместное моделирование между программными пакетами Matlab Simulink используется для установления метода ТММ. Совместное моделирование выполняется, чтобы использовать преимущества каждой программы для обработки определенных частей системы. Реакция различных методов ТММ оценивается в быстро меняющихся погодных условиях. Из результатов исследования видно, что IC-метод имеет улучшенные результаты среди сравниваемых методов ТММ, за которыми следуют методы P&O и НС ТММ как в динамическом отклике, так и в установившемся режиме в большей части нормального рабочего диапазона. Метод инкрементной проводимости имеет преимущества извлечения большей мощности по сравнению с методом возмущения и наблюдения и методом восхождения к вершине и, следовательно, более конкурентоспособен, чем два других метода для фотоэлектрической системы.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрическая ячейка, фотоэлектрический модуль, Simulink, умная сеть электроснабжения.

Введение

В последние годы спрос на энергию и количество систем распределенной генерации растут во всем мире. По этой причине важно использовать системы возобновляемой энергии в дополнение к традиционным. Среди систем возобновляемой энергетики солнечная энергия является одной из самых распространенных благодаря тому, что она является чистой, неисчерпаемой и бесплатной [1]. В последние несколько лет спрос на энергию и количество распределенных систем генерации растут во всем мире. По этой причине крайне важно использовать системы возобновляемой энергии в дополнение к традиционным [2]. Среди систем возобновляемой

энергетики солнечная энергия является одной из самых распространенных благодаря тому, что она чистая, неисчерпаемая и бесплатная. Солнечный элемент превращает солнечный свет в электричество [3]. Существует два типа фотоэлектрических систем: изолированные системы и системы, подключенные к сети. Фотоэлектрическая система, подключенная к электрической сети, состоит из солнечных элементов, соединенных последовательно или параллельно, чтобы получить фотоэлектрический модуль с выходным напряжением или выходным током, превышающим уникальный фотоэлемент; преобразователь постоянного/переменного тока для регулирования выходного напряжения фото-

электрического модуля для достижения максимальной мощности и тока; преобразователь переменного тока для передачи энергии потребителям переменного тока [4–6].

Существуют различные топологии преобразователей постоянного/переменного тока. В данной работе повышающий преобразователь предназначен для регулирования выходного напряжения солнечного модуля в зависимости от требований [7–9].

Цель исследования является изучение различных методов отслеживания точки максимальной мощности (ТММ), применяемых к фотоэлектрическим системам, и определение наи-

более эффективного метода отслеживания точки максимальной мощности.

Математическая модель для фотоэлектрической системы

На рис. 1, а, б представлены модели, наиболее часто используемые для имитации работы фотоэлемента: источник тока, параллельный одному или двум диодам [10–12]. Модель с одним диодом имеет четыре компонента: источник фототока, диод, параллельный источнику, ряд резисторов R_s и шунтирующий резистор R_{sh} . На рис. 1, б представлена модель с двумя диодами: дополнительный диод для лучшей подгонки кривой [13–15].

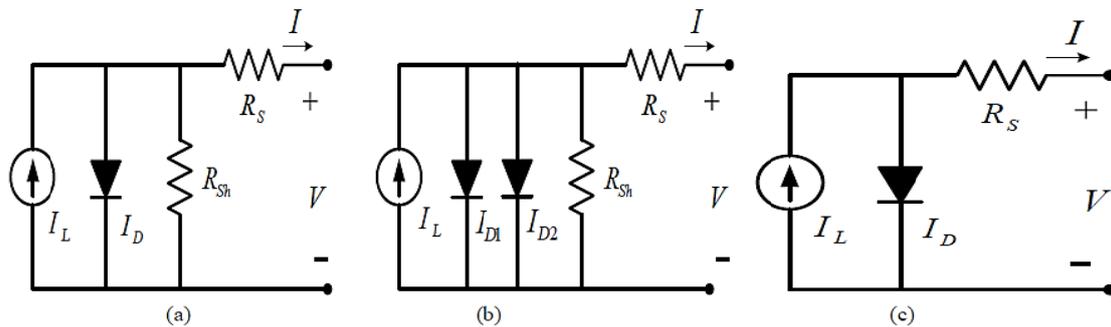


Рис. 1. Модели с эквивалентной схемой PV-ячейки: (а) модель с одним диодом, (б) модель с двумя диодами (в) упрощенная эквивалентная схема PV-системы

Fig. 1. The equivalent circuit of the PV cell models: (a) the model of single diode, (b) The model of dual diode (c) The PV equivalent diagram simplification

Сопrotивление шунта R_{sh} велико, поэтому им обычно можно пренебречь. Таким образом, четыре параметрические модели (рис. 1, а, б) могут быть упрощены до рис. 1, в упрощенной модели эквивалентной схемы.

Выходное напряжение V и ток нагрузки I соотносятся как

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где I – ток нагрузки, А; I_L – световой ток, А; I_0 – ток насыщения, А; V – выходное напряжение, В; α – коэффициент завершения измерения теплового напряжения, В R_s – последовательное сопротивление [16–18].

Система точки максимальной мощности

Алгоритм Р&О

Метод возмущения и наблюдения широко используется из-за его простоты реализации. Алгоритм Р&О заставит фотоэлектрическую систему приблизиться к точке максимальной мощности путем увеличения или уменьшения выходного напряжения фотоэлектрической панели. Основываясь на простом математическом

условии ($dP / dV = 0$), когда фотоэлектрическая матрица работает в левой области кривой МРР, выходная мощность будет увеличиваться из-за увеличения напряжения. При этом выходная мощность будет уменьшаться при увеличении напряжения, когда работает в правой области кривой ТММ. Следовательно, если $dP/dV > 0$, возмущение должно быть отменено, а если $dP/dV < 0$, возмущение должно быть отменено. Процесс повторяется до тех пор, пока рабочая точка не достигнет точки максимальной мощности, где P и V – соответственно мощность и напряжение на выходе фотоэлектрического модуля

Из-за своей простоты и меньшей сходимости для оптимального ТММ этот метод является более популярным среди всех методов, предложенных в доступной литературе

Общая проблема в этом методе заключается в том, что напряжение на клеммах фотоэлектрического модуля возмущается при каждом цикле ТММ; поэтому, когда достигается МРР, выходная мощность колеблется вокруг максимума, что приводит к потере мощности в фотоэлектрической системе [19–21].

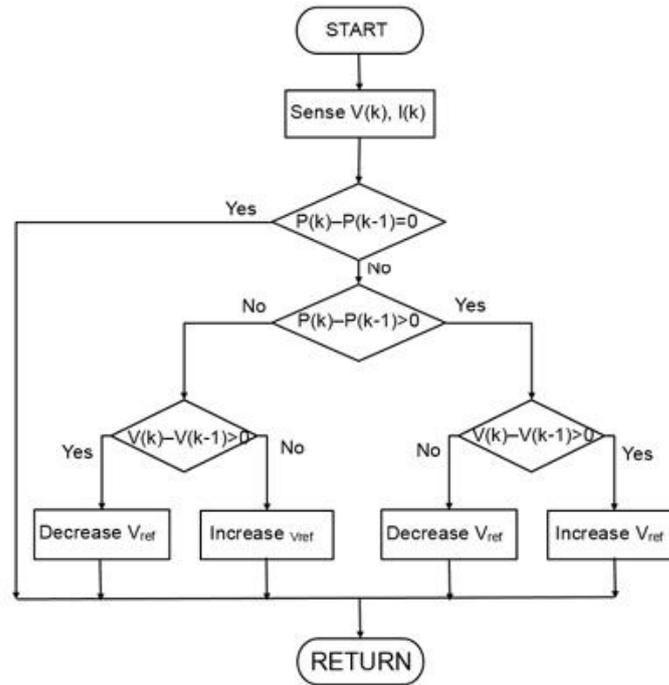


Рис. 2. Блок-схема метода TMM (P&O)

Fig. 2. Block diagram of the MPPT method (P&O)

Реализация всей системы в Matlab/Simulink показана на рис. 4. При этом реализация алгоритма отслеживания точки максимальной мощности на основе алгоритма P&O выполнена в программе MATLAB [16].

```

% определение констант
TaC=25; % температура ячейки
C=0.5; %step size
Suns=0.028; %(1 R=1000 W/m^2)
Va=31; %PV voltage
Ia= PV_model (Va,Suns,TaC);
Pa=Ia.*Va;% PV выходная мощность
Vref_new= Va+C; %new reference voltage
Va_array=[];
Pa_array=[];
Suns=[0 0.1 ; 1 0.2; 2 0.3; 3 0.3; 4 0.5; 5 0.6; 6 0.7;
7;[1.4 13 ;1.3 12 ;1.2 11 ;1.1 10 ;1 9 ;0.9 8 ;0.8
x= Suns(:,1)'; % данные о времени чтения
y= Suns(:,2)'; % считывание данных о сол-
нечной радиации
xi=1:200; % заданные точки для интерполя-
ции
yi=interp1(x,y,xi,'cubic'); %Do cubic
interpolation
for i=1:14
% считайте значение солнечной радиации
Suns=yi(i);
%take new measurement
Va_new=Vref_new;
Ia_new= PV_model (Va,Suns,TaC)
  
```

```

Pa_new=Va_new*Ia_new;
deltaPa=Pa_new-Pa;
if deltaPa>0;
if Va_new>Va;
Vref_new=Va_new+C; %increase ref
else
Vref_new=Va_new-C; %decrease ref
конец
elseif deltaPa<0
if Va_new>Va
Vref_new=Va_new-C;
else
Vref_new=Va_new+C;
конец
else
V_ref= Va_new;
End
  
```

Инкрементная проводимость (IC)

Среди всех стратегий MPPT метод инкрементной проводимости широко используется из-за высокой точности отслеживания в установившемся режиме и хорошей адаптируемости к быстро меняющимся атмосферным условиям. Этот метод использует наклон характеристик мощности массива фотоэлектрических модулей для отслеживания MPP. Алгоритм INC MPPT зависит от dP/dV , что эквивалентно нулю для целей MPP. Было предложено повысить точность отслеживания и динамическое выполнение в быстро меняющихся условиях. Блок-схема

алгоритма INC показана на рис. 3. Алгоритм начинается с цикла, находя значение $V(t)$ и $I(t)$ в момент времени t . При сравнении мгновенной проводимости с INC отслеживается MPP. На основе сравнения выходного сигнала регулируется управляющее напряжение (V_{ref}). Соответствующее уравнение, используемое в этом методе,

подробно описано. Преимущество INC заключается в лучшей работе в быстро меняющихся климатических условиях и, кроме того, обеспечивает меньшие колебания вокруг MPP. Следовательно, эффективность INC для достижения MPP примерно выше, чем у метода P&O [22–24].

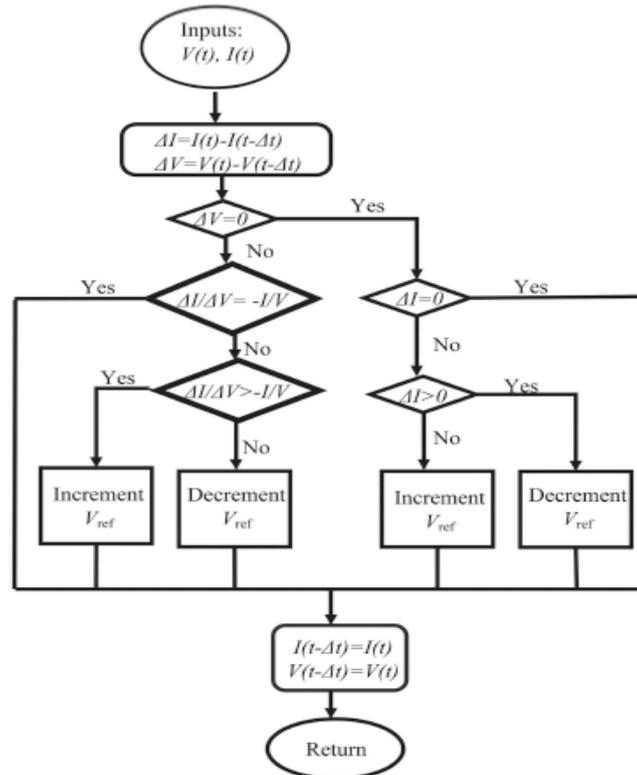


Рис. 3. Блок-схема метода ТММ, инкрементная проводимость (IC)

Fig. 3. Block diagram of the MPPT method (IC)

Реализация алгоритма отслеживания максимальной точки мощности на основе алгоритма IC выполнена в программе MATLAB [16].

```

определение констант
TaC=25; %temperature
C=.5; % размер шага
E=0.5; %maximum dI/dV error
% Определение переменных с начальными
условиями
Suns=0.045;
Va=31;
Ia= KYOCERA(Va,Suns,TaC)
Pa= Va* Ia;
Vref_new= Va+C;
Va_array=[];
Pa_array=[];
Pmax_array=[];
Suns=[0 0.1 ; 1 0.2; 2 0.3; 3 0.3; 4 0.5; 5 0.6; 6
0.7; 70

```

```

0.8; 8 0.9; 9 1; 10 1.1; 11 1.2; 12 1.3; 13 1.4;];
x= Suns(:,1)'; % данные о времени чтения
y= Suns(:,2)'; % считывание данных о сол-
нечной радиации
xi=1:200; % заданные точки для интерполя-
ции
yi=interp1(x,y,xi,'cubic'); %Do cubic
interpolation
for sample=1:14
% считывание данных о радиации
Suns=yi(sample)
% проведите новое измерение
Va_new=Vref_new;
Ia_new=kyocera(Va,Suns,TaC)
% рассчитать приращение напряжения и тока
deltaVa=Va_new-Va;
deltaIa=Ia_new- Ia;
if deltaVa==0
if deltaIa==0
Vref_new=Va_new; % no change

```

```
elseif deltaIa>0
Vref_new=Va_new+C;
else
Vref_new=Va_new-C;
end
else
if abs(deltaIa/deltaVa+Ia_new/Va_new)_<= E
Vref_new=Va_new=Va_new; %no change
else
if deltaIa/deltaVa>-Ia_new/Va_new +E
Vref_new=Va_new+C;
```

```
Vref_new= Va_new -C;
Конец
```

Примеры моделирования PV-модуля

Этот раздел иллюстрирует примеры моделирования PV-модуля. Параметры модуля были в значительной степени настроены в соответствии с LDK 250D-20 спецификации для температура ячейки (25 °C) и солнечной радиации (1000 Вт/м²). В табл. 1 показаны параметры солнечной панели [25–27].

Таблица 1. Параметры, используемые для фотоэлектрического модуля Delta BST 260-24 P при моделировании

Table 1. Parameters used for the Delta BST 260-24 P photovoltaic module in the simulation

Параметры модуля	Ценности
Максимальная мощность, P_{max}	260 Вт
Нормальная мощность	255 Вт
Максимальное напряжение питания, V_{mp}	32.6 В
Максимальный ток питания, I_{mp}	7,67 А
Температурный коэффициент для I_{sc}	0,06 %/°C
Температурный коэффициент для V_{oc}	-0,34 %/°C
Ток короткого замыкания, I_{sc}	8,75 А
Напряжение холостого хода, V_{oc}	37,5 В
Последовательное сопротивление, R_s	0,55 Ом
Число последовательно соединенных ячеек, N_s	60

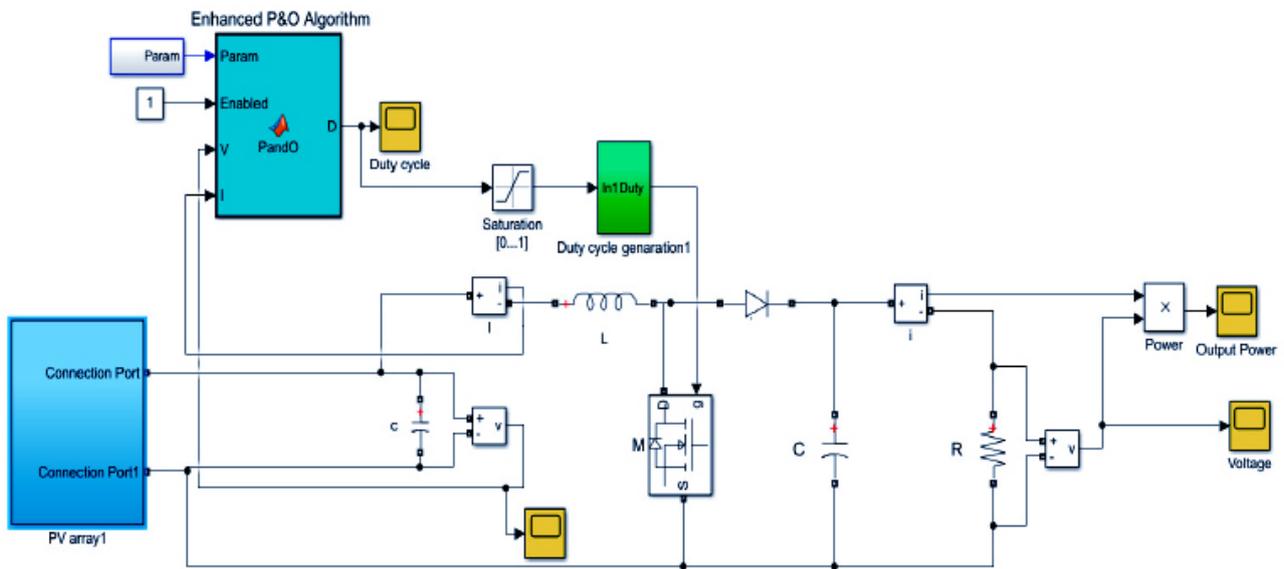


Рис. 4. Модель Simulink предлагаемой фотоэлектрической системы

Fig. 4. The proposed photovoltaic system under the Simulink Matlab environment

Результаты моделирования

На рис. 5–7 показано время запуска, необходимое для каждого исследуемого метода МРРТ для достижения максимальной мощности, соответствующей 1 кВт/м² солнечного излучения, и

при температуре 25 °C для установившегося режима. Мы находим, что метод IC имеет лучшее значение мощности, напряжение и ток, полученные методом P&o и IC.

Когда солнечное излучение уменьшается до 600 Вт/м^2 при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, мы обнаруживаем, что ток панелей и вырабатываемая мощность также уменьшаются с небольшим изменением напряжения, которое не может быть ощутимым, как показано на рис. 8–10. Кривые

характеристик P-V, V-I и P-I описаны на рис. 11–13 для фотоэлектрического модуля при различных температурах. Выходная мощность и ток фотоэлемента в основном зависят от температуры, солнечной инсоляции и рабочего напряжения элементов.

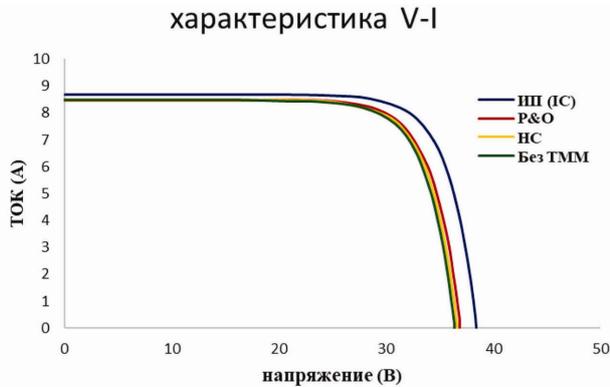


Рис. 5. ВАХ при 1000 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

Fig. 5. I-V at 1000 W/m^2 and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

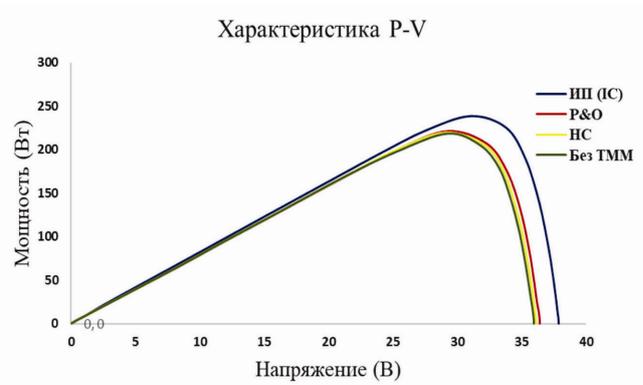


Рис. 6. P-V-характеристики при 1000 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

Fig. 6. P-V characteristics at 1000 W/m^2 and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

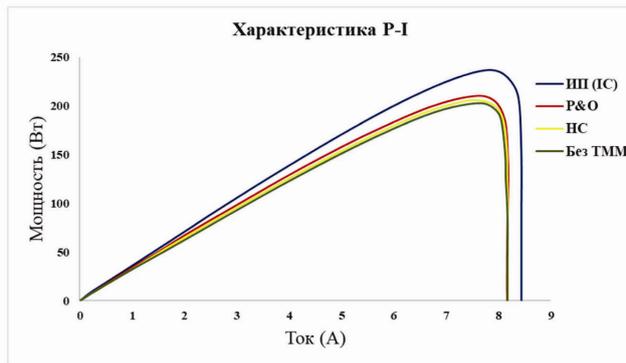


Рис. 7. P-I-характеристики при 1000 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

Fig. 7. P-I characteristics at 1000 W/m^2 and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

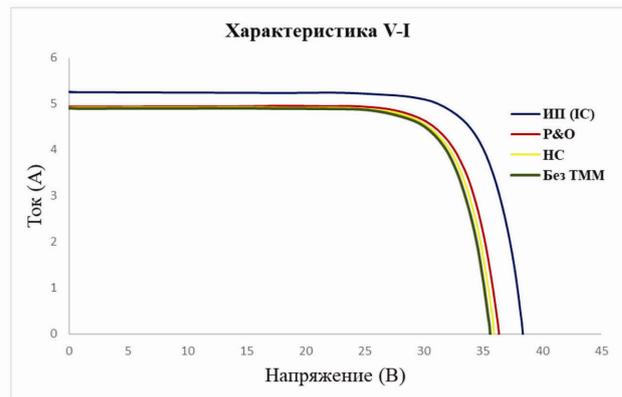


Рис. 8. ВАХ при 600 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

Fig. 8. I-V at 600 W/m^2 and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

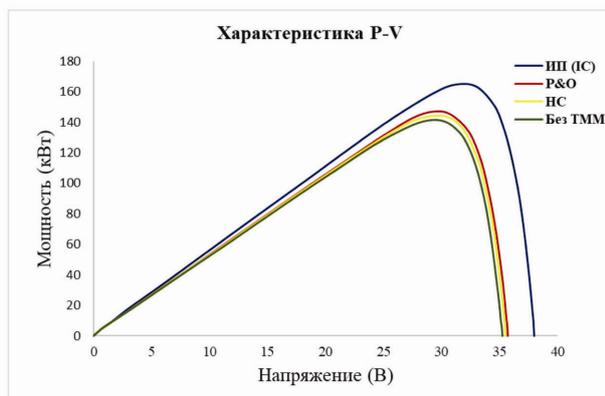


Рис. 9. P-V-характеристики при 600 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

Fig. 9. P-V characteristics at 600 W/m^2 and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

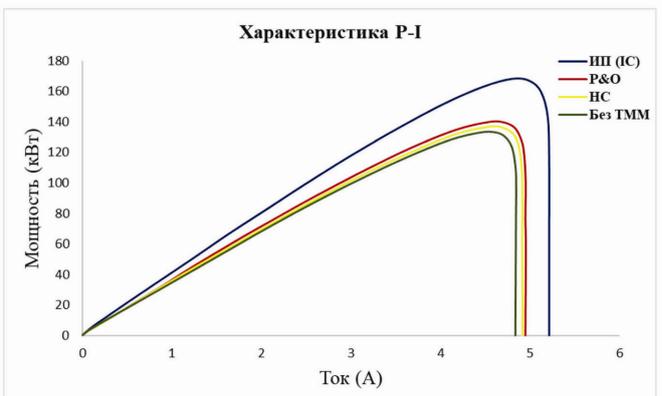


Рис. 10. P-I-характеристики при 600 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

Fig. 10. P-I characteristics at 600 W/m^2 and $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

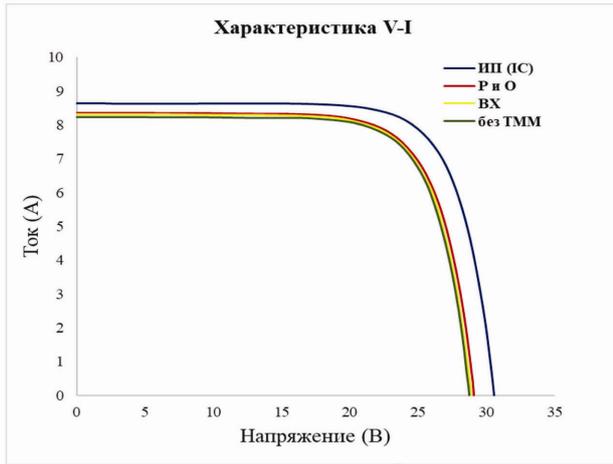


Рис. 11. ВАХ при 1000 Вт/м² и 40 °С (С3)

Fig. 11. I-V at 1000 W/m² and 40 °С (C3)

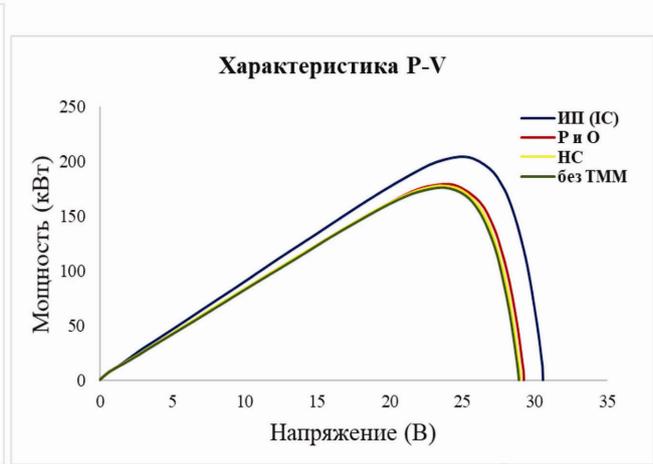


Рис. 12. P-V характеристики при 1000 Вт/м² и 40 °С (С3)

Fig. 12. P-V characteristics at 1000 W/m² and 40 °С (C3)

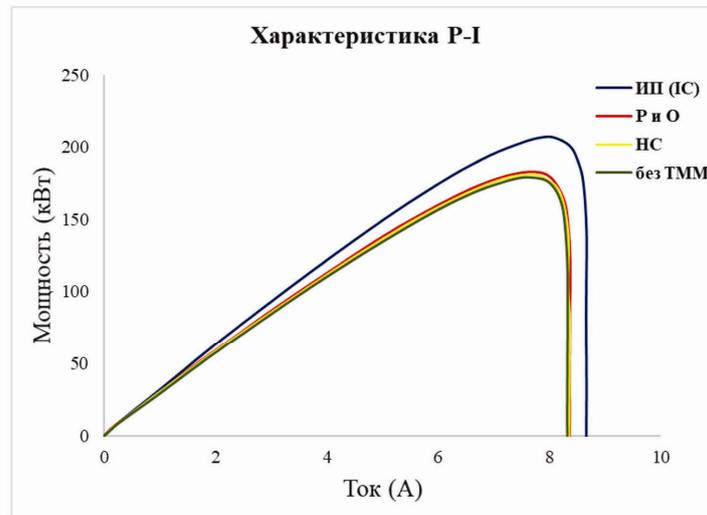


Рис. 13. P-I-характеристики при 1000 Вт/м² и 40 °С (С3)

Fig. 13. P-I characteristics at 1000 W/m² and 40 °С (C3)

В табл. 2 описана выходная мощность солнечного фотоэлектрического модуля, где С1, С2 и С3 представляют собой выходную мощность

при инсоляции 1000, 600, 1000 Вт/м² и температуре 25, 25, 40 °С соответственно.

Таблица 2. Сравнение выходной мощности солнечного фотоэлектрического модуля с использованием ТММ технических

Table 2. Comparison of the output power of a solar photovoltaic module using TMP technical

№:	Метод ТММ	С ₁	С ₂	С ₃
1	Без ТММ	210,2	148,1	178,1
2	Инкрементальная проводимость (IC)	240	163,3	205,8
3	Р&О	218,1	156,4	186,2
4	НС	214,4	153,6	181,9

Выполняется моделирование, созданное средой MATLAB/Simulink, с использованием стандартных электрических характеристик фотоэлектрического модуля Delta BST 250-24P,

в котором было проведено сравнение трех различных методов ТММ. Понятно, что методика IC имеет меньший процент снижения вырабатываемой энергии по сравнению с Р&О и НС в

предельно допустимом диапазоне. Самый быстрый метод – это метод INC. Ограниченная разница во времени запуска не оказывает значительного влияния на вырабатываемую энергию.

Заключение

В этой статье сравнивались три метода при использовании ТММ и четвертый метод без использования методов ТММ, основанных как на стационарных, так и на переходных моделях фотоэлектрической системы.

Результаты моделирования показывают, что метод IC более эффективен при генерации энергии, как показано в табл. 2, по сравнению со всеми другими методами, приведенными в этой статье. Также результаты показывают, что при использовании IC-метода произошло увеличение выработки электрической энергии на 94 % в сравнении с другими методами. Следующий по эффективности следует метод P&O, который имеет второй результат по генерации энергии. Метод HC имеет третий по эффективности результат, для последнего, четвертого метода технологии ТММ не использовались.

Таким образом, из исследования можно сделать вывод, что алгоритм MPPT с инкрементальной проводимостью является более эффективным, при этом он имеет меньшую пульсацию напряжения.

Библиографические ссылки

- Javed, K.; Ashfaq, H.; Singh, R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.
- Abo-Elyousr, F.K.; Abdelshafy, A.M.; Abdelaziz, A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.
- Amiry H. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 2018, 169, pp. 206–216.
- Aouchiche, N.; Aitcheikh, M.S.; Becherif, M.; Ebrahim, M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603.
- Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
- Bana S. and Saini R.P. A mathematical modeling framework to evaluate the performance of single diode and double diode based SPV systems. *Energy Reports*, 2016, 2, pp. 171–187.
- Kuvshinov, V.V., Abd Ali, L.M., Morozova, N.V. et al. Experimental Studies on Receiving Surfaces of Flat Solar Collectors. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* vol. 57, no. 6, pp.715–720 (2021).<https://doi.org/10.3103/S1068375521060089>.
- Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 102–112. DOI: [10.22213/2413-1172-2021-1-102-112](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-1-102-112).
- Zhang Q., Ning Xu., Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method. *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.
- Chatterjee A., Keyhani A., Kapoor D. Identification of Photovoltaic Source Models. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2011, vol. PP, pp. 1–7.
- Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием среды matlab/simulink / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, К. А. Али, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность. — 2021. № 21 (73). С. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2021-21-97-105>.
- Belkaid, A.; Colak, I.; Kayisli, K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.* 2017, 99, pp. 839–846.
- Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp.826-847.
- Sachit M.S., Shafri H.Z.M., Abdullah A.F., Rafie A.S.M. Combining Re-Analyzed Climate Data and Landcover Products to Assess the Temporal Complementarity of Wind and Solar Resources in Iraq. *Sustainability*, 2021, 14(1), 388.
- Mitrofanov, S. V., Baykasenov, D. K., & Suleev, M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In *2018 International Ural Conference on Green Energy, 2018*, (pp. 90-96). IEEE.
- Fazal, M.R.; Kamran, M.; ul Haq, I.; Abbas, Z.; Ayyaz, M.N.; Mudassar, M. Modified Perturb and Observe MPPT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2019, 9, 721–731.
- Ibrahim H. and N. Anani. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature. *Energy Procedia*, 2017, 134, pp. 276–285.
- Yin O.W. and B.C. Babu. Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018, 169, pp. 48–61.
- Техника искусственного интеллекта для производства энергии и автоматизация управления гибридной солнечно-ветро-дизельной энергетической системой / Л. М. Абдали, К. А. Али, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров, Н. В. Коровкин // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 91–100.

20. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265–275, 2018.

21. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley & Sons, 2016.

22. Pathy, S.; Subramani, C.; Sridhar, R.; Thentral, T.; Padmanaban, S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies* 2019, 12, 1451. Senol M., Abbasoglu S., Kurer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2016, 132, pp. 518–537.

23. Layth M. Abd Ali, L. M., Ali, Q. A., Klačková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshinov, V. (2021) Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 26 (4), 773–783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.

24. Xuan Hieu Nguyen, Minh Phuong Nguyen. *Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink*. Environmental Systems Research, 2015, 4, 24.

25. Моделирование режимов работы фотоэлектрической системы / Л. М. Абдали, Х. Д. Мохамед, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов, Н. В. Коровкин, Д. Ф. Бордан // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 3. С. 78–87. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-78-87.

26. Li H., Yang D., Su W. An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265–275.

27. Awad M, Ibrahim AM, Alaas ZM, El-Shahat A and Omar AI (2022), Design and analysis of an efficient photovoltaic energy-powered electric vehicle charging station using perturb and observe MPPT algorithm. *Front. Energy Res.* 10:969482. doi: 10.3389/fenrg.2022.969482

References

1. Javed, K.; Ashfaq, H.; Singh, R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.

2. Abo-Elyousr, F.K.; Abdelshafy, A.M.; Abdelaziz, A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.

3. Amiry H. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 2018, 169, pp. 206–216.

4. Aouchiche, N.; Aitcheikh, M.S.; Becherif, M.; Ebrahim, M.A. AI-based global MPPT for partial shaded

grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603

5. Abd Ali, L. M., Al-Rufae, F. M., Kuvshinov, V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.

6. Bana S. and Saini R.P. A mathematical modeling framework to evaluate the performance of single diode and double diode based SPV systems. *Energy Reports*, 2016, 2, pp. 171–187.

7. Kuvshinov, V.V., Abd Ali, L.M., Morozova, N.V. et al. Experimental Studies on Receiving Surfaces of Flat Solar Collectors. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* vol. 57, no. 6, pp. 715–720 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521060089>.

8. Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Smart Control System for the Wind Energy Networks. In *Vestnik IzGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021. Vol. 24. N. 1. P. 102–112 (in Russ.). doi: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112

9. Q. Zhang, Xu. Ning, and Z. Ye, "MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method," *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.

10. Chatterjee A., Keyhani A., Kapoor D. Identification of Photovoltaic Source Models. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2011, vol. PP, pp. 1–7.

11. Abdali L.M., Issa H.A., Ali Q.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. Analysis and simulation off-grid pv panels by using matlab simulink environment. In *Construction and industrial safety*. 2021. № 21 (73). Pp. 97–105 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2021-21-97-105>.

12. Yin, O.W. and B.C. Babu, Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018. 169: p. 48–61.

13. Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp. 826–847.

14. Sachit M.S., Shafri H.Z.M., Abdullah A.F., Rafie A.S.M. Combining Re-Analyzed Climate Data and Landcover Products to Assess the Temporal Complementarity of Wind and Solar Resources in Iraq. *Sustainability*, 2021, 14(1), 388.

15. Mitrofanov, S. V., Baykasenov, D. K., & Suleev, M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In *2018 International Ural Conference on Green Energy*, 2018, (pp. 90–96). IEEE.

16. Fazal, M.R.; Kamran, M.; ul Haq, I.; Abbas, Z.; Ayyaz, M.N.; Mudassar, M. Modified Perturb and Observe MPPT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2019, 9, 721–731.

17. Ibrahim H. and N. Anani. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature. *Energy Procedia*, 2017, 134, pp. 276–285.

18. Yin O.W. and B.C. Babu. Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV)

module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018, 169, pp. 48-61.

19. Abdali L.M., Ali Q.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A., Korovkin N.V. The artificial intelligence technique for the energy generation and administration of the hybrid solar/wind/diesel power system. In *Construction and industrial safety*. 2021. No. 22. Pp. 91-100 (in Russ.). DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-91-100.

20. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265–275, 2018.

21. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley & Sons, 2016.

22. Pathy, S.; Subramani, C.; Sridhar, R.; Thentral, T.; Padmanaban, S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies* 2019, 12, 1451. Senol M., Abbaso` glu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2016, 132, pp. 518-537.

23. Layth M. Abd Ali, L M., Ali, Q. A., Klačková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshimov, V.

(2021) Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 26 (4), 773-783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.

24. Xuan Hieu Nguyen, Minh Phuong Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*, 2015, 4, 24.

25. Abdali L.M., Mohammed H.J., Yakimovich B.A., et al. Modeling the Operating Modes of a Photovoltaic System. In *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021. Vol. 24. No. 3. Pp. 78-87 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-78-87.

26. Li H., Yang D., Su W. An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265-275.

27. Awad M, Ibrahim AM, Alaas ZM, El-Shahat A and Omar AI (2022), Design and analysis of an efficient photovoltaic energy-powered electric vehicle charging station using perturb and observe MPPT algorithm. *Front. Energy Res.* 10:969482. doi: 10.3389/fenrg.2022.969482.

Analysis Study and Comparison of Different Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems

L. M. Abdali, Postgraduate Student, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

H. A. Issa, Postgraduate Student, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

M. N. Al-Maliki, Postgraduate Student, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

B. A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V. V. Kuvshinov, PhD in Engineering, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The use of control systems for photovoltaic installations significantly increases the generation of electrical energy and the efficiency of their use. Solar power supply systems are highly dependent on various climatic factors and therefore there is a real need to use automatic control systems for their various energy parameters, such as current, voltage and power. One of the promising systems for monitoring the energy characteristics of photovoltaic installations is MPPT systems (systems for monitoring maximum power points). This article explores the impact of various maximum power point (MPP) tracking methods applied to photovoltaic systems. This work uses methods like climb-to-top (HC), incremental conduction (IC), and perturbation and observation (P&O). A model of a photovoltaic module and a DC boost converter with various TMM "machine theory" methods were modeled using Matlab software. A joint simulation between Matlab Simulink software packages is used to establish the TMM method. Co-simulation is performed to take advantage of each program to process certain parts of the system. The response of various TMM methods is evaluated in rapidly changing weather conditions. The results show that IC performed best among the compared TMM methods, followed by P&O and HC TMM methods in both dynamic response and steady-state over most of the normal operating range. The incremental conduction method has the advantage of extracting more power compared to perturbation and observation. Method and climb-to-top method and are therefore more competitive than the other two methods in a photovoltaic system.

Keywords: solar energy, photovoltaic cell, photovoltaic module, Simulink, smart power grid.

Получено: 04.05.22