

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА/POWER ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44> EDN: PAUGRQ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК НА ИХ ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Научная статья

Михно Р.В.^{1,*}, Елаев А.Л.²^{1,2} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mihno.ruslan[at]mail.ru)

Предложена: 20.04.2026; Принята: 06.07.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

Эффективность фотоэлектрических станций существенно снижается при частичном затенении панелей, что требует совершенствования алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ). Целью данной работы является анализ влияния неравномерной освещенности фотоэлектрических цепочек на их выходные характеристики с точки зрения создания условий для некорректной работы алгоритмов ОТММ. В настоящей статье рассмотрено 37 вариантов частичного затенения цепочки из 20 модулей HVL-320/HJT. В среде SimInTech получены выходные характеристики отдельных модулей, на основе которых в электронных таблицах построены характеристики цепочек. По полученным характеристикам определены напряжения глобальных и локальных точек максимальной мощности (ЛТММ), ожидаемые направления движения алгоритмов ОТММ, а также потери мощности при ошибочной фиксации в ЛТММ. По результатам моделирования в 8 из 36 случаев недовыработка мощности составила в среднем 11,86%. Наибольшие потери характерны для сценариев, в которых существенному затенению подвержено не более одной трети модулей цепочки.

Ключевые слова: солнечная панель, станция, глобальные, локальные максимумы, алгоритмы отслеживания, частичное затенение, моделирование, SimInTech.

A STUDY OF THE EFFECT OF UNEVEN ILLUMINATION ON THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC CHAINS

Research article

Mikhno R.V.^{1,*}, Elaev A.L.²^{1,2} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

* Corresponding author (mihno.ruslan[at]mail.ru)

Suggested: 20.04.2026; Accepted: 06.07.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

The efficiency of photoelectric stations is significantly reduced when the panels are partially shaded, which requires improvement of the algorithms for tracking the point of maximum power (TPMP). The aim of this work is to analyse the effect of uneven illumination of photoelectric chains on their output characteristics, with a focus on creating conditions that cause TPMP algorithms to malfunction. This article examines 37 scenarios of partial shading of a chain comprising 20 HVL-320/HJT modules. The output characteristics of individual modules were obtained using the SimInTech environment, based on which the characteristics of the chains were constructed in spreadsheets. Using the obtained characteristics, the voltages of the global and local maximum power points (LMPP), the expected directions of movement of the MPP tracking algorithms, and the power losses due to erroneous locking at the LMPP were determined. According to the simulation results, in 8 out of 36 cases, the power shortfall averaged 11.86%. The greatest losses were observed in scenarios where no more than one-third of the modules in the string were subject to significant shading.

Keywords: solar panel, power station, global and local maxima, tracking algorithms, partial shading, modelling, SimInTech.

Введение

Солнечная энергетика активно интегрируется в различные энергетические системы, как локальные, так и объединенные. Это вызывает рост потребности в повышении эффективности её функционирования.

Для решения данной задачи ключевое значение имеют алгоритмы, предназначенные для отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ). В процессе улучшения этих алгоритмов особое внимание уделяется оперативности и точности нахождения так называемой глобальной точки максимальной мощности (ГТММ), особенно в условиях изменчивой солнечной инсоляции и частичного затенения фотоэлектрических модулей (ФЭМ).

Существует множество различных подходов к реализации методов ОТММ. Их можно разделить на традиционные, интеллектуальные, оптимизационные и гибридные [1]. Из традиционных алгоритмов наиболее широко применяются методы возмущения и наблюдения (Р&О) [2], возрастающей проводимости (IC) [3], постоянного напряжения (CV) [4]. К преимуществам этих алгоритмов относятся их высокая скорость выполнения и невысокие требования к вычислительной мощности микроконтроллеров [5]. Однако среди их недостатков — пульсации около ГТММ, ошибки

при резких изменениях окружающих условий и при частичном затенении ФЭМ. Модификации данных методов, как правило, направлены на повышение скорости отклика и снижение колебаний вблизи ГТММ.

Интеллектуальные методы ОТММ, в отличие от традиционных, требуют значительно больших вычислительных ресурсов. К ним относятся такие методы, как генетический алгоритм (GA) [6], управление на основе нечеткой логики (FLC) [7], а также искусственной нейронной сети (NNA) [8]. Оптимизационные алгоритмы по уровню требуемых вычислительных ресурсов занимают промежуточное положение между традиционными и интеллектуальными методами. Примерами таких алгоритмов включают метод оптимизации роя частиц (PSO) [9], стаи серых волков (GWO) [10], традиционного модельно-прогнозирующего управления (CMPC) [11].

В контексте многообразия существующих методов отслеживания точки максимальной мощности ОТММ наблюдается активная исследовательская деятельность, направленная на сравнительную оценку их эффективности. В [5] проводится сравнение традиционного алгоритма P&O и его адаптивной модификации. В [12] проведено сравнение алгоритмов ОТММ P&O и IC с алгоритмом ОТММ, выполненным на основе FLC. В [13] проводилось сравнение эффективности алгоритмов P&O, IC, FLC и NNA, результаты которого не демонстрируют явного превосходства какого-либо из рассматриваемых подходов. В [14] исследуется производительность алгоритма PSO и его гибридной версии с IC. В [15] предложена адаптивная версия P&O, которая показала лучшие результаты по сравнению с традиционным P&O, IC, модифицированным P&O и FLC. Оценка эффективности алгоритмов в указанных работах проводилась по критериям точности и быстродействия ОТММ при вариациях равномерной освещенности или температуры фотоэлектрических модулей.

Особого внимания заслуживают трудности, возникающие при отслеживании ГТММ при переменной освещенности. В таких условиях вольтамперные характеристики (ВАХ) модулей становятся дискретными, что часто приводит к смещению истинной ГТММ и появлению локальных точек максимальной мощности (ЛТММ). Алгоритмы отслеживания максимальной мощности (ОТММ) в подобных ситуациях должны адаптироваться, переходя от анализа характеристик предыдущего состояния ГТММ к новому. Если алгоритм ошибочно идентифицирует ЛТММ как истинную ГТММ, эффективность работы фотоэлектрической системы (ФЭС) снижается. Активно ведутся исследования по улучшению методов отслеживания максимальной мощности (ОТММ) в условиях частичного затенения ФЭМ.

Например, в [16] предложена модификация алгоритма NNA, использующая элементы IC. В исследовании показана большая точность предложенного алгоритма по сравнению с NNA. В [17] предложен метод оптимизации на основе комбинации механизмов роста (ауксина) и увядания. Метод показал большую эффективность по сравнению с PSO, GA, GWO. В [18] сравнивается эффективность алгоритмов P&O, IC и CV при последовательном набегании частичного затенения на поле ФЭМ 10x10. В работе показаны случаи, когда оба алгоритма фиксируются в ЛТММ. Преобразование основано на исследовании авторов [19], в котором выполнено моделирование 700 вариантов частичных затенений цепочки из трех панелей. Авторы пришли к выводу, что для поиска ГТММ достаточно исследовать только 10% от всей выходной характеристики ФЭМ. Следует отметить, что в большинстве из указанных работ эффективность разработанных алгоритмов ОТММ оценивалась на произвольно взятых примерах изменения освещенности ФЭМ.

Настоящая работа ставит целью анализ того, как различные типы неравномерного затенения влияют на выходные характеристики фотоэлектрических цепочек с точки зрения создания условий для некорректной работы алгоритмов ОТММ.

Научная новизна настоящей работы заключается в выявлении случаев затенения фотоэлектрической цепочки, при которых ожидается переход параметров фотоэлектрической цепочки в точки локальных максимумов мощности, и в оценке величины недопроизводства электрической энергии при таких переходах. Полученные результаты могут быть использованы для тестирования алгоритмов ОТММ.

Методы и принципы исследования

Оценка изменения выходных характеристик фотоэлектрических модулей производилась на основе солнечных панелей модели HVL-320/HJT [20]. При стандартных условиях тестирования данные модули обладают следующими ключевыми параметрами:

- ток в рабочей точке $I_{mpp} = 8,83$ А;
- ток короткого замыкания $I_{sc} = 9,33$ А;
- напряжение в рабочей точке $V_{mpp} = 36,28$ В;
- напряжение холостого хода $V_{oc} = 43,97$ В.

Как правило, упомянутые модули объединяются в последовательные цепочки по 20 штук. В данной статье проанализируем следующие вероятные сценарии затенения таких цепочек:

- возникновение четного количества модулей, подверженных равномерному затенению с потерей освещенности на 25 и 50%;

- появление четного числа затененных модулей, среди которых часть испытывает равномерное снижение освещенности на 25 или 50%, а оставшаяся часть подвержена градиентному затенению с плавным переходом от незатененного состояния. Например, в ситуации, когда на 25% затенены 4 основных модуля, а градиентный переход охватывает 8 соседних панелей, распределение затененности будет выглядеть так: 4 панели — 25%, 2 панели — 20%, 2 панели — 15%, 2 панели — 10%, 2 панели — 5%. Здесь и в последующем изложении для упрощения модели градиент принят ступенчатым, с постоянным уровнем затенения в пределах площади одной панели, а также зеркально-симметричным, то есть пары панелей затеняются симметрично с обеих сторон от центральной группы наиболее затененных модулей цепочки.

Шаг изменения освещенности в 25% для основных панелей был выбран с целью получения наиболее репрезентативных результатов, при этом не перегружающих таблицы излишними данными.

Математическая модель, использованная для снятия выходных характеристик, представлена на рисунке 1. Субмодель фотоэлектрической цепочки (12), состоящая из блоков «фотоэлемент полупроводниковый», «диод силовой», подключена параллельно «источнику напряжения» (11), ЭДС которого изменяется в результате работы разности константы (2) и работы интегрирующего звена «ПИД-регулятора» (13), получающего обратную связь по току в цепи (10). Измеряемые «вольтметром идеальным» (3) и «амперметром идеальным» (4) значения напряжения и тока в цепи используются для расчета мощности (5), записи в файл (7) и построения выходных характеристик (8, 9). Освещенность фотоэлектрической цепочки задаётся константой (1). Скорость изменения тока — линейным источником. «Временные графики» (9) и «фазовый портрет» (8) используются для проверки работы и отладки модели. Блок «стоп-расчет» (6) останавливает запись значений после снижения напряжения нагрузки ниже нуля.

В качестве ключевых параметров затенения, подлежащих оценке в рамках данной работы, выделим следующие:

- 1) напряжение, при котором достигается глобальный максимум мощности (ГТММ);
- 2) напряжение, соответствующее локальному максимуму мощности (ЛТММ), в области которого находится значение напряжения ГТММ для равномерно освещенной цепочки до возникновения затенения;
- 3) снижение выходной мощности фотоэлектрической цепочки при функционировании на напряжении ЛТММ, по сравнению с режимом работы в точке ГТММ.

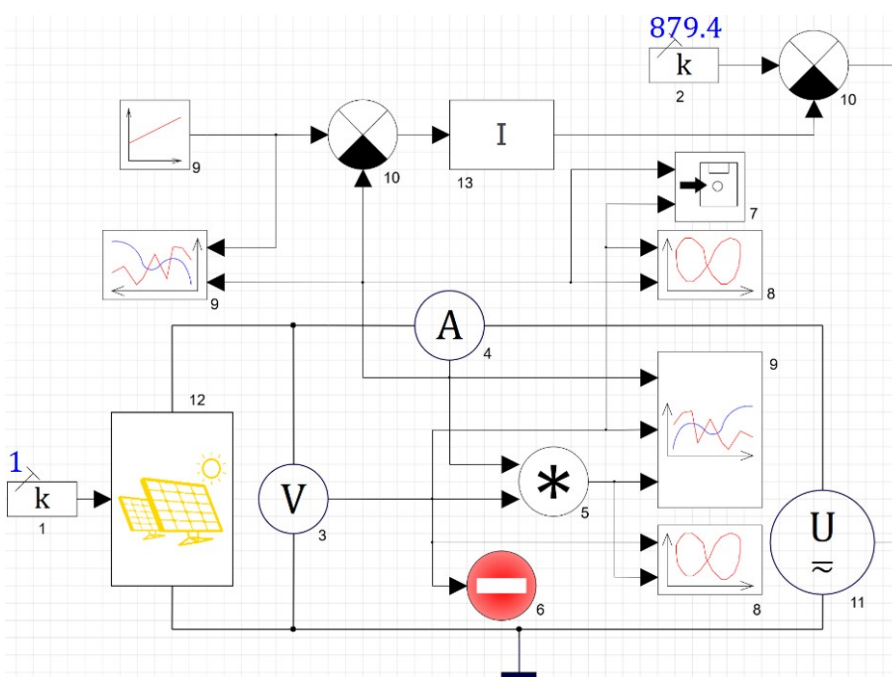


Рисунок 1 - Математическая модель для снятия выходных характеристик фотоэлектрической цепочки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.1>

Примечание: (1) константа; (2) работа разности константы; (3) «вольтметр идеальный»; (4) «амперметр идеальный»; (5) расчет мощности; (6) блок «стоп-расчет»; (7) записи в файл; (8, 9) построение выходных характеристик; (10) обратная связь по току в цепи; (11) «источник напряжения»; (12) субмодель фотоэлектрической цепочки; (13) интегрирующее звено «ПИД-регулятора»

В настоящем исследовании запланирован расчет 37 вариантов затенения фотоэлектрических цепочек, построение выходных характеристик осуществлялось при помощи математической модели, изображенной на рисунке 2. Были определены выходные характеристики отдельных фотоэлектрических модулей для ряда относительных значений освещенности: 1, 0,95, 0,9, 0,85, 0,8, 0,75, 0,7, 0,6, 0,5. Расчет данных характеристик базируется на математических выражениях, приведенных в [21]. Полученные индивидуальные характеристики были трансформированы в совокупные выходные характеристики фотоэлектрических цепочек для различных сценариев затенения. На этих выходных характеристиках осуществляется поиск ЛТММ, в которую, вероятнее всего, алгоритм ОТММ приведет фотоэлектрическую цепочку при её неравномерном затенении. Для определения ЛТММ фиксируются значения напряжения предшествующей затенению ГТММ. Соответственно этому значению определяется направление ожидаемого движения алгоритма ОТММ на ВАХ, соответствующей частичному затенению фотоэлектрической цепочки. Ближайший локальный максимум и принимается за значение ЛТММ. В исследовании рассматривается ожидаемое поведение алгоритма поиска точки максимальной мощности, исходя из предположения, что в момент изменения освещенности напряжение фотоэлектрической цепочки не будет изменяться. После изменения освещенности алгоритм ОТММ ведёт параметры режима фотоэлектрической цепочки в направлении возрастания выдаваемой мощности, до ближайшего локального максимума, который может оказаться как ЛТММ, так и ГТММ.

Основные результаты

В процессе проведения экспериментов было выполнено математическое моделирование 37 сценариев затенения фотоэлектрической цепочки, один из которых является базовым и соответствует условию полного отсутствия затенения (вариант № 37). Условные номера, присвоенные каждому из сценариев, систематизированы в таблице 1. Вариант № 37 в данной таблице не отражен, поскольку он описывает состояние равномерной освещенности цепочки.

Таблица 1 - Варианты затенения фотоэлектрической цепочки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.2>

Снижение освещенности	Градиент затенения	Количество затененных панелей без учета градиентного затенения								
		2	4	6	8	10	12	14	16	18
25 %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	8	10	11	12	13	14	-	-	-	-
50 %	0	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	2	24	25	26	27	28	29	30	31	-
	8	32	33	34	35	36	-	-	-	-

Для перечисленных выше сценариев были сформированы таблицы, содержащие следующие данные: значения напряжения в глобальной точке максимальной мощности (таблица 2), значения напряжения и мощности в локальной точке максимальной мощности (таблицы 3 и 4 соответственно), которая является ближайшей к исходному положению ГТММ, а также величины относительных потерь мощности, обусловленных переходом работы системы в ЛТММ вместо ГТММ (таблица 5).

Таблица 2 - Напряжения глобальных точек максимальной мощности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.3>

Снижение освещенности	Градиент затенения	Количество затененных панелей без учета градиентного затенения								
		2, В	4, В	6, В	8, В	10, В	12, В	14, В	16, В	18, В
25 %	0	651,6	770,1	758,4	755,5	745,7	744,3	735,7	735,1	727,3
	8	764,3	759,1	747,5	745,1	743,0	-	-	-	-
50 %	0	651,6	579,2	506,8	434,4	767,4	754,6	741,9	741,2	729,8
	2	579,2	506,8	434,4	767,4	764,9	752,2	739,5	738,8	-
	8	620,3	788,5	773,4	758,3	756,2	-	-	-	-

Согласно данным, приведенным в таблице 2, диапазон отклонения напряжения ГТММ от исходного значения лежит в пределах от -40% до +8,9%. В большинстве проанализированных случаев (75%) наблюдалось увеличение напряжения ГТММ. При этом амплитуда положительных изменений существенно уступает масштабу снижения напряжения в тех вариантах, где оно имело место. Максимальное падение напряжения зафиксировано для вариантов № 18 и № 26, которые соответствуют затенению 8 и 6 фотоэлектрических модулей с уменьшением освещенности на 50% соответственно.

Таблица 3 - Напряжения точек локальных максимумов мощности, наиболее близких к предшествующей глобальной точке максимальной мощности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.4>

Снижение освещенности	Градиент затенения	Количество затененных панелей без учета градиентного затенения								
		2, В	4, В	6, В	8, В	10, В	12, В	14, В	16, В	18, В
25 %	0	775,8	770,1	758,4	755,5	745,7	744,3	735,7	735,1	727,3

Снижение	Градиент	Количество затененных панелей без учета градиентного затенения								
		2, В	4, В	6, В	8, В	10, В	12, В	14, В	16, В	18, В
	8	764,3	759,1	747,5	745,1	743,0	-	-	-	-
50 %	0	651,6	800,0	784,9	769,8	767,4	754,6	741,9	741,2	729,8
	2	696,6	797,5	782,4	767,4	764,9	752,2	739,5	738,8	-
	8	713,1	788,5	773,4	758,3	756,2	-	-	-	-

Как следует из таблицы 3, вариация напряжения ближайшей ЛТММ относительно предшествующего значения ГТММ находится в интервале от -10% до $+10,5\%$. В $91,67\%$ рассмотренных вариантов напряжение в точке ближайшего локального максимума возросло (в среднем на 5%). Наибольшие по абсолютной величине смещения напряжения характерны для сценариев № 15, № 16 и № 25.

Таблица 4 - Мощность в точках локальных максимумов мощности, наиболее близких к предшествующей точке максимальной мощности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.5>

Снижение освещенности	Градиент затенения	Количество затененных панелей без учета градиентного затенения								
		2, Вт	4, Вт	6, Вт	8, Вт	10, Вт	12, Вт	14, Вт	16, Вт	18, Вт
25 %	0	5407,6	5313,6	5233,0	5160,2	5093,0	5031,5	4973,1	4917,8	4865,6
	8	5326,9	5238,0	5157,4	5089,0	5022,8	-	-	-	-
50 %	0	5767,0	3671,8	3602,6	3533,5	3468,4	3410,9	3353,3	3298,3	3247,8
	2	4855,6	3660,5	3591,4	3522,2	3457,5	3400,0	3342,5	3287,8	-
	8	3936,1	3619,2	3550,0	3480,8	3418,0	-	-	-	-

Представленные в таблице 4 данные показывают, что изменение мощности в ближайшей ЛТММ по отношению к исходной мощности ГТММ (6407,78 Вт) варьируется в пределах от -10% до $-49,3\%$. Причем в большинстве ситуаций, связанных с затенением модулей на 50% , падение выходной мощности превышает $42,7\%$.

Таблица 5 - Невыдача мощности, обусловленная работой вне глобальной точки максимальной мощности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.6>

Снижение освещенности	Градиент затенения	Количество затененных панелей без учета градиентного затенения								
		2, %	4, %	6, %	8, %	10, %	12, %	14, %	16, %	18, %
25 %	0	6,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
50 %	0	0,00	28,37	19,68	8,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	5,28	18,39	6,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	8	2,23	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

В соответствии с данными таблицы 5, в 8 из исследованных сценариев существует высокая вероятность того, что алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) зафиксируют работу системы в точке локального, а не глобального максимума. Недополучение мощности рассчитывается как разница между мощностью в ГТММ и мощностью в ЛТММ, в которую, вероятно, приведет фотоэлектрическую цепочку алгоритм отслеживания точки максимальной мощности. Усредненная величина недополученной мощности для данных случаев составляет $11,86\%$. Преобладающая часть подобных сценариев относится к ситуациям, когда снижение освещенности на 50% затрагивает не более половины модулей в цепочке, а остальные остаются незатененными.

На рисунке 2 продемонстрированы выходные характеристики фотоэлектрических цепочек для вариантов освещенности под номерами 24, 26, 27 и 37. Вариант № 24 предполагает затенение 2 модулей, вариант № 26 — 6 модулей, вариант № 27 — 8 модулей. В дополнение к основному затенению, в каждом из указанных случаев еще 2

модуля подвержены градиентному затемнению. До достижения определенного порогового уровня напряжения частичное затемнение модулей не оказывает заметного влияния на конфигурацию выходной характеристики цепочки. Для варианта № 24 напряжение, при котором начинает проявляться эффект затемнения, составляет приблизительно 505 В, для вариантов № 26 и № 27 — 401 В и 304 В соответственно. Таким образом, с увеличением числа затемненных модулей в цепочке наблюдается смещение точки локального максимума мощности в область более низких напряжений.

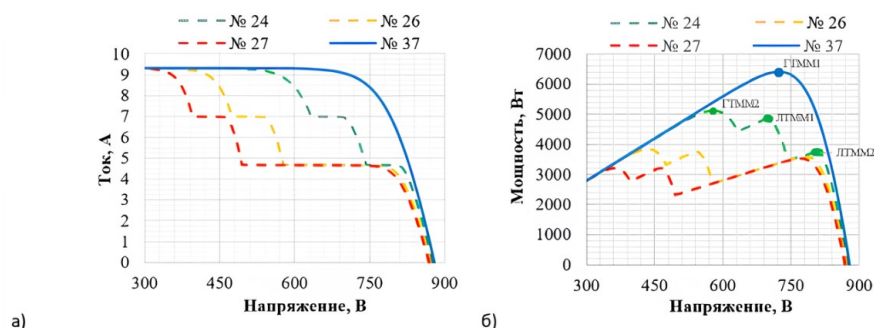


Рисунок 2 - Выходные характеристики фотоэлектрических цепочек с неравномерным затемнением ФЭМ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.44.7>

В связи с тем, что значение напряжения ГТММ в исходном равномерно освещенном режиме (724.04 В) попадает в область действия частичного затемнения, следует предполагать, что алгоритм ОТММ будет функционировать в направлении увеличения выходного напряжения цепочки до момента достижения ближайшего локального пика мощности. В сценарии затемнения № 27 этот ближайший локальный максимум (767,4 В) совпадает с положением глобального максимума, вследствие чего цепочка сможет вырабатывать максимально доступную в данных условиях мощность. Напротив, для сценариев № 24 и № 26 идентифицированные локальные максимумы (696,6 В и 782,4 В) не соответствуют точкам глобального максимума, что с высокой вероятностью приведет к недополучению мощности в размере 5.28% и 6.59% соответственно.

Заключение

Резюмируя результаты моделирования 36 вариантов частичного затемнения фотоэлектрической цепочки, состоящей из 20 последовательно включенных модулей, можно сделать следующие выводы:

- в 75% рассмотренных случаев частичное затемнение приводило к незначительному (до 9%) повышению напряжения ГТММ. В подобных обстоятельствах, как правило, исходное напряжение ГТММ располагается на восходящем участке выходной характеристики цепочки, что создает предпосылки для успешного нахождения нового глобального максимума существующими алгоритмами ОТММ;
- в ситуациях, когда частичное затемнение вызывает смещение ГТММ в область существенно меньших напряжений, величина такого снижения может достигать 40% от исходного уровня. Если падение напряжения ГТММ превышает 10% относительно начального значения, существует высокий риск потери алгоритмами ОТММ истинного глобального пика мощности;
- из 36 проанализированных сценариев частичного затемнения в 8 случаях был спрогнозирован переход алгоритма ОТММ к работе в режиме локального максимума. Средний уровень потерь вырабатываемой мощности для данных ситуаций оценивается в 11,86%. Наибольшие потери характерны для сценариев, в которых затемнению на 50% подвержено не более одной трети модулей цепочки.

Стоит дополнительно подчеркнуть, что отрицательное влияние частичного затемнения выражается не только в потенциальных ошибках работы алгоритмов ОТММ, но и в принципиальной невозможности в ряде конфигураций обеспечить отбор максимально доступной мощности от каждого отдельного модуля. В среднем по 36 изученным примерам возникновение неравномерного затемнения снижало предельно достижимую выходную мощность на 32%. При гипотетической ситуации, когда каждый модуль функционировал бы автономно, вне последовательной цепочки, аналогичное снижение составило бы значительно меньшую величину — порядка 13%.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bollipo R.B. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques / R.B. Bollipo, S. Mikkili, P.K. Bonthagorla // CSEE Journal of Power and Energy Systems. — 2021. — 7. — P. 9–33. — DOI: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720
2. Gil-Velasco A. Modification of the Perturb and Observe Method to Improve the Energy Harvesting of PV Systems under Partial Shading Conditions / A. Gil-Velasco, C.A. Aguilar-Castillo. // Energies; — Cuernavaca: ENERGIES, 2021. doi: 10.3390/en14092521
3. Bakar Siddique M.A. Implementation of Incremental Conductance MPPT Algorithm with Integral Regulator by Using Boost Converter in Grid-Connected PV Array / M.A. Bakar Siddique, A. Asad, R.M. Asif et al. // IETE Journal of Research; — New Delhi: Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, 2023. — P. 3822–3825. doi: 10.1080/03772063.2021.1920481
4. Lasheen Mohamed Performance Enhancement of Constant Voltage Based MPPT for Photovoltaic Applications Using Genetic Algorithm / Mohamed Lasheen, AliKamel Abdel-Rahman, Mazen Abdel-Salam et al. // Energy Procedia; edited by CPESE — 100. — Kitakyushu: CPESE, 2016. — P. 217–222. doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.168
5. Русский В.А. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора / В.А. Русский, С.М. Семёнов, Р.К. Диксон // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2016. — № 4. — С. 78–87.
6. Ouatman Hamid A genetic algorithm approach for flexible power point tracking in partial shading conditions / Hamid Ouatman, Nour-Eddine Boutammachte. // Results in Engineering; — 24. — Amsterdam: Elsevier B.V., 2024. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102940
7. Asif Rao Design and analysis of robust fuzzy logic maximum power point tracking based isolated photovoltaic energy system / Rao Asif, Ateeq Rehman, Saif Rehman et al. // Engineering Reports; — 2. — Hoboken: John Wiley and Sons Inc, 2020. — P. 1–16. doi: 10.1002/eng2.12234
8. Allahabadi S. Fast Artificial Neural Network Based Method for Estimation of the Global Maximum Power Point in Photovoltaic Systems / S. Allahabadi, H. Iman-Eini, S. Farhangi. // IEEE Transactions on Industrial Electronics; — United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. — P. 5879–5888. doi: 10.1109/TIE.2021.3094463
9. Azeem Fawad Load Management and Optimal Sizing of Special-Purpose Microgrids Using Two Stage PSO-Fuzzy Based Hybrid Approach / Fawad Azeem, Ashfaq Ahmad, Taimoor Gondal et al. // Energies; — Basel: MDPI, 2022. doi: 10.3390/en15176465
10. Jayaudhaya J. Improved Performance Analysis of PV Array Model Using Flower Pollination Algorithm and Gray Wolf Optimization Algorithm / J. Jayaudhaya, K. Kumar, V. Selvi et al. // Mathematical Problems in Engineering; — Egypt: Hindawi Publishing Corporation, 2022. — P. 1–17. doi: 10.1155/2022/5803771
11. Siddique M.A.B. An adapted model predictive control MPPT for validation of optimum GMPP tracking under partial shading conditions / M.A.B. Siddique, D. Zhao, A.U. Rehman et al. // Scientific reports; — Great Britain: Nature Publishing Group, 2024. — P. 9462. doi: 10.1038/s41598-024-59304-z
12. Мухамбедьяров Б.Б. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей / Б.Б. Мухамбедьяров, Д.В. Лукичев, Н.Л. Полюга. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики; — Санкт-Петербург: ИТМО, 2018. — С. 1099–1107. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107
13. Vaibhav Anant Comparative Analysis of MPPT Techniques for PV in Domestic Applications / Anant Vaibhav, Sarthak Jain, Lovely Goyal. // Power India International Conference (PIICON); — Delhi: Power India International Conference (PIICON), 2014. doi: 10.1109/34084POWERI.2014.7117636
14. Burhanudin K. Performance analysis on convergence of particle swarm optimization and incremental conductance MPPT method for NTR 5E3E PV module / K. Burhanudin, Z. Abas, S. Asmai et al. // International Journal of Advances in Intelligent Informatics; — Kemdiktisaintek: Universitas Ahmad Dahlan, 2025.
15. Singh Jaswant Comparative Analysis of MPPT Control Techniques to Enhance Solar Energy Utilization and Convergence Time Under Varying Meteorological Conditions and Loads / Jaswant Singh, Surya Singh, K. Verma et al. // Frontiers in Energy Research; — Switzerland: Frontiers Media SA, 2022. — P. 10. doi: 10.3389/fenrg.2022.856702
16. Nunes H. Bypass diode effect and photovoltaic parameter estimation under partial shading using a hill climbing neural network algorithm / H. Nunes, F. Morais, J. Pombo et al. // Frontiers in Energy Research; — Switzerland: Frontiers Media SA, 2022. doi: 10.3389/fenrg.2022.837540
17. Hu P. A Novel Auxin and Wither Mechanism Combination Optimization Algorithm for Maximum Power Point Tracking of PV Systems Under Partial Shading / P. Hu, A. Ukil. // Renewable Energy; — Amsterdam: Elsevier, 2025. doi: 10.1016/j.renene.2025.123911
18. Ignatev N. Maximum Power Point Tracking Algorithms Research in Terms of Uneven Shading of Solar Panels / N. Ignatev, S. Yakibchuk, N. Konoplev et al. // Energy Ecosystems: Prospects and Challenges, Applied Digital Technologies; — Switzerland: Springer, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-24820-7_1
19. Harrison A. Solar irradiance estimation and optimum power region localization in PV energy systems under partial shaded condition / A. Harrison, N. Alombah Ndongmo, J. Nguimfack. // Heliyon; — Amsterdam: Elsevier BV, 2023. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18434
20. Солнечный модуль HVL-320/HJT // АО “Хевел”. — Новочебоксарск, 2026. — URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-320hjt/> (дата обращения: 28.02.2026).
21. ЭЦД – Фотоэлемент полупроводниковый // SimInTech: Справка. — 2026. — URL: https://help.simintech.ru/10_biblioteki_blokov/elektrika/ec_dinamika_2.0/istochniki/ecd_fotoelem_poluprovodn.html (дата обращения: 28.02.2026).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bollipo R.B. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques / R.B. Bollipo, S. Mikkili, P.K. Bonthagorla // CSEE Journal of Power and Energy Systems. — 2021. — 7. — P. 9–33. — DOI: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720
2. Gil-Velasco A. Modification of the Perturb and Observe Method to Improve the Energy Harvesting of PV Systems under Partial Shading Conditions / A. Gil-Velasco, C.A. Aguilar-Castillo. // Energies; — Cuernavaca: ENERGIES, 2021. doi: 10.3390/en14092521
3. Bakar Siddique M.A. Implementation of Incremental Conductance MPPT Algorithm with Integral Regulator by Using Boost Converter in Grid-Connected PV Array / M.A. Bakar Siddique, A. Asad, R.M. Asif et al. // IETE Journal of Research; — New Delhi: Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, 2023. — P. 3822–3825. doi: 10.1080/03772063.2021.1920481
4. Lasheen Mohamed Performance Enhancement of Constant Voltage Based MPPT for Photovoltaic Applications Using Genetic Algorithm / Mohamed Lasheen, AliKamel Abdel-Rahman, Mazen Abdel-Salam et al. // Energy Procedia; edited by CPESE — 100. — Kitakyushu: CPESE, 2016. — P. 217–222. doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.168
5. Russkin V.A. Issledovanie algoritmov poiska tochki maksimal'noj moshhnosti dlya povy'shayushhego preobrazovatelya napryazheniya solnechnogo invertora [Research on algorithms for finding the maximum power point for a solar inverter's boost converter] / V.A. Russkin, S.M. Semyonov, R.K. Dikson // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. — 2016. — № 4. — P. 78–87. [in Russian]
6. Ouatman Hamid A genetic algorithm approach for flexible power point tracking in partial shading conditions / Hamid Ouatman, Nour-Eddine Boutammachte. // Results in Engineering; — 24. — Amsterdam: Elsevier B.V., 2024. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102940
7. Asif Rao Design and analysis of robust fuzzy logic maximum power point tracking based isolated photovoltaic energy system / Rao Asif, Ateeq Rehman, Saif Rehman et al. // Engineering Reports; — 2. — Hoboken: John Wiley and Sons Inc, 2020. — P. 1–16. doi: 10.1002/eng2.12234
8. Allahabadi S. Fast Artificial Neural Network Based Method for Estimation of the Global Maximum Power Point in Photovoltaic Systems / S. Allahabadi, H. Iman-Eini, S. Farhangi. // IEEE Transactions on Industrial Electronics; — United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. — P. 5879–5888. doi: 10.1109/TIE.2021.3094463
9. Azeem Fawad Load Management and Optimal Sizing of Special-Purpose Microgrids Using Two Stage PSO-Fuzzy Based Hybrid Approach / Fawad Azeem, Ashfaq Ahmad, Taimoor Gondal et al. // Energies; — Basel: MDPI, 2022. doi: 10.3390/en15176465
10. Jayaudhaya J. Improved Performance Analysis of PV Array Model Using Flower Pollination Algorithm and Gray Wolf Optimization Algorithm / J. Jayaudhaya, K. Kumar, V. Selvi et al. // Mathematical Problems in Engineering; — Egypt: Hindawi Publishing Corporation, 2022. — P. 1–17. doi: 10.1155/2022/5803771
11. Siddique M.A.B. An adapted model predictive control MPPT for validation of optimum GMPP tracking under partial shading conditions / M.A.B. Siddique, D. Zhao, A.U. Rehman et al. // Scientific reports; — Great Britain: Nature Publishing Group, 2024. — P. 9462. doi: 10.1038/s41598-024-59304-z
12. Muxambet'yarov B.B. Issledovanie algoritmov poiska tochki maksimal'noj moshhnosti dlya povy'sheniya e'ffektivnosti fotoe'lektricheskix preobrazovatelej [Research on algorithms for finding the maximum power point to improve the efficiency of photovoltaic converters] / B.B. Muxambet'yarov, D.V. Lukichev, N.L. Polyuga. // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics, and Optics; — Saint Petersburg: ITMO, 2018. — P. 1099–1107. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107 [in Russian]
13. Vaibhav Anant Comparative Analysis of MPPT Techniques for PV in Domestic Applications / Anant Vaibhav, Sarthak Jain, Lovely Goyal. // Power India International Conference (PIICON); — Delhi: Power India International Conference (PIICON), 2014. doi: 10.1109/34084POWERI.2014.7117636
14. Burhanudin K. Performance analysis on convergence of particle swarm optimization and incremental conductance MPPT method for NTR 5E3E PV module / K. Burhanudin, Z. Abas, S. Asmai et al. // International Journal of Advances in Intelligent Informatics; — Kemdiktisaintek: Universitas Ahmad Dahlan, 2025.
15. Singh Jaswant Comparative Analysis of MPPT Control Techniques to Enhance Solar Energy Utilization and Convergence Time Under Varying Meteorological Conditions and Loads / Jaswant Singh, Surya Singh, K. Verma et al. // Frontiers in Energy Research; — Switzerland: Frontiers Media SA, 2022. — P. 10. doi: 10.3389/fenrg.2022.856702
16. Nunes H. Bypass diode effect and photovoltaic parameter estimation under partial shading using a hill climbing neural network algorithm / H. Nunes, F. Morais, J. Pombo et al. // Frontiers in Energy Research; — Switzerland: Frontiers Media SA, 2022. doi: 10.3389/fenrg.2022.837540
17. Hu P. A Novel Auxin and Wither Mechanism Combination Optimization Algorithm for Maximum Power Point Tracking of PV Systems Under Partial Shading / P. Hu, A. Ukil. // Renewable Energy; — Amsterdam: Elsevier, 2025. doi: 10.1016/j.renene.2025.123911
18. Ignatev N. Maximum Power Point Tracking Algorithms Research in Terms of Uneven Shading of Solar Panels / N. Ignatev, S. Yakibchuk, N. Konoplev et al. // Energy Ecosystems: Prospects and Challenges, Applied Digital Technologies; — Switzerland: Springer, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-24820-7_1
19. Harrison A. Solar irradiance estimation and optimum power region localization in PV energy systems under partial shaded condition / A. Harrison, N. Alombah Ndongmo, J. Nguimfack. // Heliyon; — Amsterdam: Elsevier BV, 2023. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18434



20. HVL-320/HJT Solar Module // JSC Hevel. — Novocheboksarsk, 2026. — URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-320hjt/> (accessed: 28.02.2026). [in Russian]

21. ECD – Semiconductor Photocell // SimInTech: Help. — 2026. — URL: https://help.simintech.ru/10_biblioteki_blokov/elektrika/ec_dinamika_2.0/istochniki/ecd_fotoelem_poluprovodn.html (accessed: 28.02.2026). [in Russian]