

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/TPDW7598>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/QRUF1160>

***Н. Б. Құттыбай¹, Д. К. Сыбанбаева², С. О. Орынбасар³,
А. А. Каппарова⁴, А. Б. Болатбек⁵**

^{1,2,3,4,5}Қазақский Национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5723-6642>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8713-2042>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9124-2560>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8348-902X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7613-5507>

*e-mail: nurjigit.10.93@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПОВ КОНТРОЛЛЕРОВ НА ВЫХОДНУЮ МОЩНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлена сравнительная оценка производительности двух типов контроллеров: системы отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) и контроллеров, основанных на широтно-импульсной модуляции (ШИМ), применительно к различным конфигурациям фотоэлектрических установок. Анализ охватывает как фиксированные солнечные панели, так и установки с одноосными и двухосными механизмами слежения за солнцем. Целью исследования являлась проверка гипотезы о том, что замена дорогостоящих ОТММ-контроллеров на более экономичные ШИМ-контроллеры может быть оправдана в условиях минимального влияния на общую энергетическую эффективность. Для оценки различий в работе контроллеров использовались статистические методы: критерий Стьюдента и критерий Колмогорова–Смирнова. Результаты показали, что в случае фиксированных фотоэлектрических систем статистически значимых отличий в эффективности между контроллерами не наблюдается ($p > 0,05$ по обоим критериям), что открывает возможность снижения капитальных затрат без ущерба для производительности. Однако в установках с трекерами эффективность ОТММ оказалась существенно выше, что

подтверждается низкими значениями p ($p < 0,05$), указывающими на достоверные различия. Таким образом, было установлено, что рациональность применения того или иного типа контроллера зависит от архитектуры системы. Если в фиксированных системах допустима установка более простых ШИМ-контроллеров, то в трекерах их использование приводит к потерям в выработке энергии. Полученные выводы имеют практическую значимость при проектировании и оптимизации солнечных энергетических установок с учётом соотношения «затраты – эффективность».

Ключевые слова: фотоэлектрические установки, контроллер ОТММ, контроллер ШИМ, статистический анализ, энергетическая эффективность.

Введение

В условиях стремительного истощения ископаемых энергетических ресурсов и нарастающих экологических проблем переход к возобновляемым источникам энергии становится жизненно необходимым для обеспечения устойчивого развития. Среди всех видов возобновляемых источников энергии особенно перспективной считается солнечная энергия, поскольку она доступна в большинстве регионов, экологически безопасна и обладает значительным потенциалом для масштабирования. При этом фотоэлектрические модули играют ключевую роль в преобразовании солнечного излучения в электрическую энергию, составляя основу солнечных энергетических систем [1; 2].

Несмотря на активное развитие технологий, доля солнечной энергии в мировом энергобалансе остаётся относительно низкой. Основными ограничениями являются сравнительно невысокий коэффициент полезного действия (КПД) коммерческих модулей и высокая стоимость их производства и установки. Эффективность фотоэлектрических систем значительно снижается при частичном затенении и нестабильной освещённости, что характерно для реальных условий эксплуатации. В этой связи ведётся активная разработка как конструктивных, так и алгоритмических решений, направленных на повышение энергоэффективности [3].

В числе перспективных направлений можно отметить использование многопереходных солнечных элементов с разной шириной запрещённой зоны, применение оптических концентраторов [4], а также солнечных трекеров, позволяющих модулям следовать за движением солнца и увеличивать уровень поглощаемой радиации [5; 6]. Сравнительные исследования показывают, что одноосные и двухосные трекеры значительно превосходят стационарные установки по показателям генерации энергии. Однако внедрение таких

систем требует эффективных методов управления и оптимизации процессов преобразования энергии.

Ключевым элементом управления в фотоэлектрических системах выступают контроллеры заряда аккумуляторных батарей. Наиболее эффективными считаются контроллеры отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ), которые адаптируют работу системы к текущим условиям освещённости и обеспечивают получение максимальной выходной мощности. Также применяются более простые контроллеры, работающие на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), реализующие заряд аккумуляторов за счёт изменения длительности управляющих импульсов. Существуют различные алгоритмы ОТММ – от классических до интеллектуальных и оптимизационных, причём последние демонстрируют лучшие результаты в условиях частичного затенения за счёт способности находить глобальные максимумы мощности [7].

Результаты ряда исследований свидетельствуют, что сочетание солнечных трекеров с ОТММ-контроллерами обеспечивает более высокую энергетическую эффективность по сравнению со стационарными модулями [8; 9]. Тем не менее, в мировой практике наибольшее распространение получили именно стационарные фотоэлектрические установки, что связано с их конструктивной надёжностью и меньшими инвестиционными затратами. Это подчёркивает важность проведения всестороннего анализа технико-экономической целесообразности использования контроллеров ОТММ в сравнении с контроллерами ШИМ в различных типах фотоэлектрических установок. [10; 11].

В данной работе проведено углублённое сравнительное исследование эффективности контроллеров ОТММ и ШИМ с использованием статистических методов анализа. Применены два ключевых подхода: проверка различий между выборками и сопоставление распределений. На основе годового массива данных по глобальной горизонтальной освещённости и расчётных значений выходной мощности фотоэлектрических систем с солнечными трекерами и с фиксированным положением выполнена количественная оценка влияния типа контроллера на производительность систем.

Новизна данной работы заключается в применении комплексного статистического подхода к анализу эффективности различных типов контроллеров в фотоэлектрических системах различной конфигурации на основе реальных климатических данных. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору технических решений, обеспечивая оптимальное соотношение между энергетической производительностью и экономическими затратами, что имеет практическую ценность при

проектировании и эксплуатации современных солнечных энергетических систем.

Материалы и методы

В настоящем исследовании для анализа эффективности контроллеров зарядки аккумуляторных батарей были применены два статистических метода – т-критерий Стьюдента и критерий Колмогорова–Смирнова. Первый из них позволил провести сравнение выборок по их средним значениям, а второй – оценить степень соответствия распределений полученных данных, обеспечив комплексную проверку различий между контроллерами.

В рамках исследования был проведён теоретический расчёт вырабатываемой мощности фотоэлектрических систем с учётом солнечной радиации, поступающей в течение года. Для анализа использовались данные солнечного излучения за 2024 год, включающие показатели глобальной горизонтальной радиации (GHI), прямой нормальной радиации (DNI) и рассеянного излучения (DI). Расчёт количества солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность земли, осуществлялся по формуле:

$$GHI = DNI * \cos\theta_{\text{сол}} + DI \quad (1)$$

где $\theta_{\text{сол}}$ – угол высоты Солнца над горизонтом.

Мощность, вырабатываемая фотоэлектрической системой, зависит от её конструктивных особенностей. Расчёт солнечной радиации для фиксированных панелей, одноосных и двухосных трекеров проводился по следующим уравнениям:

Для двухосных трекеров:

$$G_d = DNI + DI \quad (2)$$

Для одноосных трекеров:

$$G_o = DNI * \cos(\Delta\theta) + DI \quad (3)$$

Для фиксированных панелей:

$$G_{\phi} = DNI * \cos(\Delta\theta) * \cos(\Delta\gamma) + DI \quad (4)$$

где $\Delta\theta$ – угол между нормалью к поверхности панели и направлением на Солнце в вертикальной плоскости, $\Delta\gamma$ – соответствующий угол в горизонтальной плоскости.

Одноосные трекеры отслеживают Солнце по азимуту в течение дня, при этом угол наклона панели в вертикальной плоскости остаётся фиксированным, равным географической широте местности. Для Алматы оптимальный угол наклона составляет 45° , что используется как для фиксированных панелей, так и для одноосных трекеров.

Выработка электроэнергии E рассчитывается по формуле:

$$E = G * \eta_{\text{п}} * \eta_{\text{к}} * A \quad (5)$$

где: G – мощность солнечного излучения (по формулам выше), $\eta_{\text{п}}$ – КПД солнечной панели, $\eta_{\text{к}}$ – КПД контроллера, A – площадь солнечной панели.

В расчётах использовалась солнечная панель мощностью 60 Вт. Рассматривались контроллеры двух типов: ОТММ и ШИМ. КПД контроллера ОТММ варьировался от 97,5 % до 80 %, а КПД ШИМ – от 85 % до 75 %.

На рисунке 1 представлены месячные графики выходной мощности фотоэлектрических систем в течение года. Видно, что системы с одноосным и двухосным трекерами имеют схожий профиль мощности, однако одноосный трекер генерирует меньше энергии. Фиксированная система демонстрирует отличную форму и меньшую величину мощности. Минимальная мощность фиксированной системы – 2,6 кВт·ч, у трекеров – около 3,8 кВт·ч.

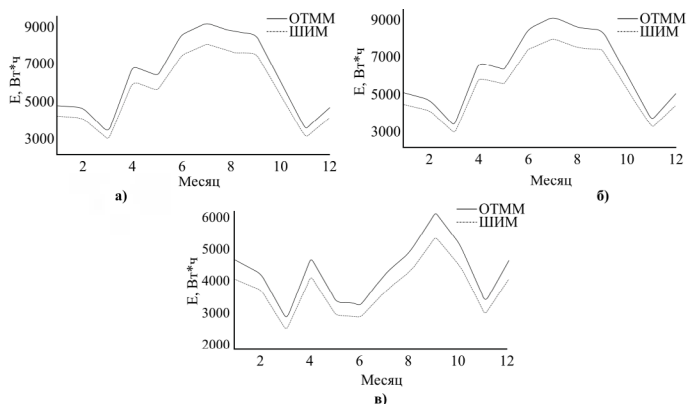


Рисунок 1 – Графическое представление с указанием погрешностей значений выходной мощности, полученной за год эксплуатации каждой из фотоэлектрических установок: одноосный трекер (а), двухосный трекер (б), стационарная установка (в)

Выходная мощность фотоэлектрических систем преобразовывалась с помощью двух типов контроллеров – ОТММ и ШИМ. Исходя из предварительных предположений, ожидалось, что контроллер ОТММ обеспечит более высокую выходную мощность по сравнению с ШИМ-контроллером. Однако при использовании ШИМ-контроллера наблюдалось существенное рассеяние данных, что могло быть связано с его менее точной адаптацией к изменениям во входной мощности, в отличие от более оперативного отклика ОТММ.

Для проверки этой гипотезы применялись два статистических критерия: т-критерий Стьюдента и критерий Колмогорова–Смирнова. Первый из них позволяет оценить, насколько различия между средними значениями эффективности двух групп являются статистически значимыми. В контексте данного исследования нулевая гипотеза заключалась в равенстве средних значений эффективности контроллеров, а альтернативная – в наличии различий:

$$H_a = Eff_{\text{ОТММ}} \neq Eff_{\text{ШИМ}} \quad (6)$$

$$Eff = \frac{\sum Eff_i}{n} \quad (7)$$

где, $\overline{Eff}$ – среднее значение эффективности контроллера, n – количество наблюдений в выборке.

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (Eff_i - \overline{Eff})^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$m_r = \frac{Sd}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

где, Sd – стандартное отклонение, m_r — ошибка репрезентативности.

На основе этих значений вычислялся т-критерий по формуле:

$$t = \frac{Eff_{\text{ОТММ}} - Eff_{\text{ШИМ}}}{\sqrt{m_{r\text{ОТММ}}^2 + m_{r\text{ШИМ}}^2}} \quad (10)$$

Критерий Колмогорова–Смирнова, в отличие от т-критерия, не требует предположения о нормальном распределении данных. Он применяется для оценки степени совпадения двух распределений. Формально он определяется выражением:

$$K_n = \sqrt{n} * \sup_x |F_0(x) - \hat{F}_n(x)| \quad (11)$$

где, $\sup_x$ – максимальное значение выражения внутри модуля по всей области определения, $F_0(x)$ – теоретическая функция распределения, – эмпирическая функция распределения на основе выборки из элементов.

Каждый из этих методов применяется в зависимости от особенностей распределения данных. В данном случае их совместное использование позволило получить более достоверные выводы.

В процессе имитационного моделирования было проведено 5000 повторений, при которых значения эффективности контроллеров задавались случайным образом в пределах заранее определённых диапазонов. На основе сгенерированных данных были рассчитаны р-значения для статистической проверки гипотез о различии в эффективности между контроллерами.

Согласно результатам анализа по т-критерию Стьюдента (рисунок 2), для одноосных и двухосных солнечных трекеров р-значения оказались существенно ниже уровня значимости 0,05. Это указывает на наличие статистически значимых различий в работе контроллеров. В случае фиксированных фотоэлектрических систем р-значения колебались в пределах от 0,046 до 0,27, а их среднее значение составило около 0,12, что не позволяет с высокой достоверностью утверждать о различиях между контроллерами.

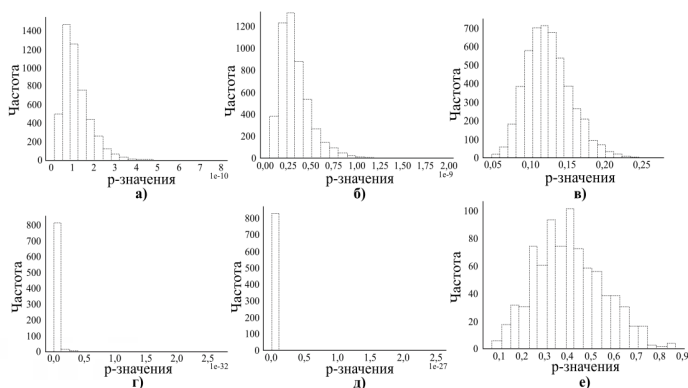


Рисунок 2 – Результаты статистического анализа: т-тест (а – двухосный трекер, б – одноосный трекер, в – фиксированная система) и тест Колмогорова–Смирнова (г – двухосный трекер, д – одноосный трекер, е – фиксированная система)

Анализ с использованием критерия Колмогорова–Смирнова (рисунок 2) также продемонстрировал, что для трекеров p -значения достигают порядка 10^{-32} , подтверждая значительные различия в распределении эффективности. Для фиксированных систем p -значения варьировались в диапазоне от 0,1 до 0,85 со средним значением около 0,4, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий.

Результаты и обсуждение

Установка включает в себя солнечные панели мощностью 60 Вт. Каждая панель размещена на металлической раме: одна из них зафиксирована под оптимальным углом 45° к горизонту, вторая снабжена механизмом одноосного трекера, третья – двухосной системой слежения за Солнцем. Одноосная и двухосная системы слежения работают на основе астрономических расчётов положения Солнца.

Для определения траектории движения Солнца используются такие параметры, как угол склонения, высота Солнца над горизонтом и азимутальный угол. Вычисленные координаты заранее рассчитываются для каждого дня года и записываются на контроллер управления.

Система мониторинга параметров представлена несколькими функциональными блоками. В ней установлены датчики тока и напряжения, измеряющие значения до преобразования, а также контроллеры ОТММ и ШИМ. После контроллеров размещены дополнительные датчики, регистрирующие параметры на выходе системы. В качестве нагрузки используется аккумуляторная батарея. Центральный управляющий модуль ESP32 обрабатывает данные, поступающие от сенсоров, и передаёт их по беспроводному каналу связи.

Экспериментальные исследования проводились в условиях ясной и переменной облачности. На рисунке 3(а) представлены графики выходной мощности фотоэлектрических установок с контроллером заряда аккумулятора на основе ОТММ. Анализ показал, что применение одноосного трекера с ОТММ-контроллером обеспечивает увеличение средней выходной мощности по сравнению со стационарной фотоэлектрической системой на 12,8 % в условиях высокой солнечной активности и на 12,5 % при частичной облачности. Двухосный трекер при аналогичных условиях демонстрирует прирост выходной мощности на 15 % и 13,4 % соответственно.

На рисунке 3(б) приведены графики выходной мощности для трёх типов систем (стационарной, с одноосным и двухосным трекерами), использующих ОТММ- и ШИМ-контроллеры. В частности, применение ОТММ-контроллера в одноосной системе позволяет повысить эффективность преобразования энергии на 9,4 % и 10,9 % по сравнению с аналогичной системой, использующей ШИМ-контроллер. Согласно данным рисунка 3(б),

двухосная система с ОТММ-контроллером демонстрирует более высокую эффективность – на 10,3 % и 14,2 % по сравнению с системой на основе ШИМ. На рисунке также представлены результаты для фиксированной солнечной панели: использование ОТММ-контроллера повышает выходную мощность на 9,5 % и 16,5 % по сравнению с ШИМ-контроллером.

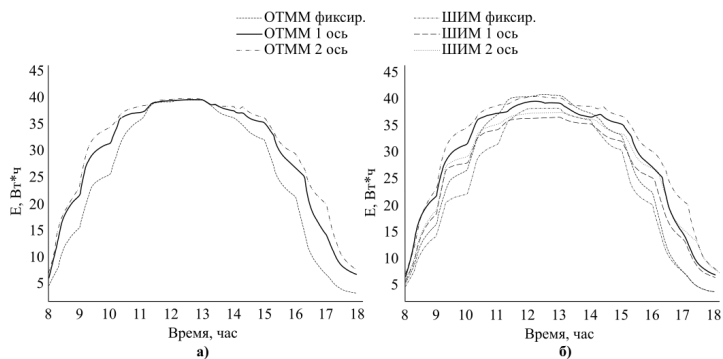


Рисунок 3 – Сравнительные графики выходной мощности фотоэлектрических систем с различной конфигурацией при использовании контроллеров ОТММ и ШИМ

Таким образом, вне зависимости от типа установки (стационарная или с трекерами), применение контроллера с функцией отслеживания точки максимальной мощности обеспечивает значительное улучшение энергетических характеристик по сравнению с контроллерами на основе широтно-импульсной модуляции.

Для проведения статистического анализа экспериментальных данных была оценена эффективность преобразования энергии при использовании различных типов контроллеров в течение дня (рисунок 4). Наивысший коэффициент преобразования мощности показал контроллер с функцией отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ), достигнув значения 96 %. В то же время максимальная эффективность преобразования при использовании контроллера с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) не превышала 90 %. Минимальные значения эффективности составляли 80 % для ОТММ-контроллера и 70 % для ШИМ-контроллера.

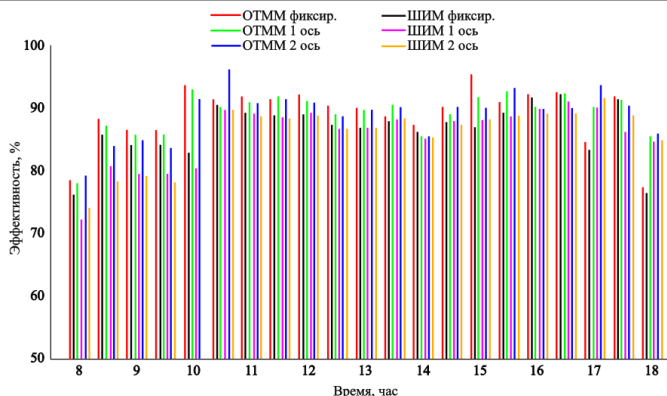


Рисунок 4 – Суточная эффективность контроллеров ОТММ и ШИМ

На рисунке 5 представлена эмпирическая функция распределения для каждой конфигурации фотоэлектрической системы в сочетании с соответствующими контроллерами.

Результаты статистического анализа показывают, что для фиксированной фотоэлектрической системы средняя эффективность преобразования энергии при использовании ШИМ-контроллера составила 87,9 % при стандартном отклонении 4,022 и средней ошибке 0,8776. Значения p по критериям Стьюдента ($p = 0,20$) и Колмогорова-Смирнова ($p = 0,1963$) превышают уровень значимости 0,05, что указывает на отсутствие статистически значимых различий между данными. При этом эффективность с ОТММ-контроллером составила 89,14 % при стандартном отклонении 4,556 и средней ошибке 0,9942, однако эта разница не является достоверной. Достоверность различий в данном случае оценивается в 60 %.

Для системы с одноосным солнечным трекером эффективность преобразования энергии с ШИМ-контроллером составила 86,24 % при стандартном отклонении 4,9398 и средней ошибке 1,0779. Значение p по t -критерию равно 0,01, а по критерию Колмогорова-Смирнова – 0,0410, что подтверждает наличие статистически значимых различий. Использование ОТММ-контроллера обеспечило более высокую эффективность на уровне 89,15 % при меньших разбросах значений: стандартное отклонение составило 3,4990, а средняя ошибка – 0,7635. Достоверность различий оценивается на уровне 90 %.

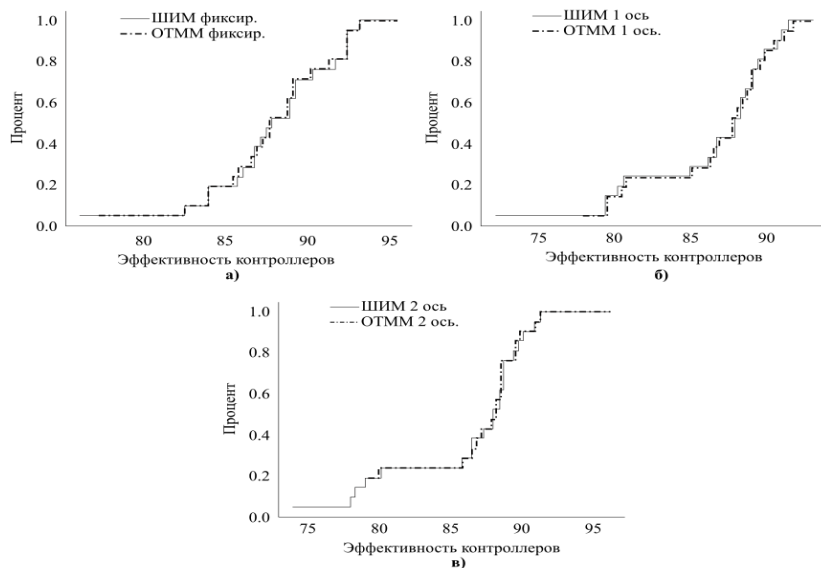


Рисунок 5 – Эмпирические функции распределения эффективности контроллеров для каждого типа фотоэлектрической системы

В случае двухосной системы ШИМ-контроллер обеспечил эффективность 86,17 % при стандартном отклонении 4,9917 и средней ошибке 1,0892. Значения p по t -критерию (0,0025) и критерию Колмогорова-Смирнова (0,0159) указывают на наличие высокой статистической значимости.

С ОТММ-контроллером эффективность увеличилась до 89,06 %, а стандартное отклонение и средняя ошибка составили 3,9194 и 0,8552 соответственно. Достоверность различий составила 95 %.

Таким образом, наиболее значительное увеличение эффективности при переходе от ШИМ к ОТММ-контроллеру наблюдается в системах с трекерами, что подтверждается статистическим анализом. В фиксированной системе разница есть, но она не является статистически значимой.

Выводы

В ходе исследования была проведена сравнительная оценка эффективности контроллеров ОТММ и ШИМ в составе различных конфигураций фотоэлектрических систем. С использованием t -критерия Стьюдента и критерия Колмогорова-Смирнова было установлено, что для одноосных и двухосных солнечных трекеров ОТММ-контроллеры обеспечивают статистически значимое увеличение выходной мощности по

сравнению с ШИМ. В то же время, для фиксированных панелей существенной разницы в эффективности не наблюдается. Таким образом, для стационарных систем целесообразно применение более доступных ШИМ-контроллеров, тогда как для систем с трекерами предпочтительнее использование ОТММ-контроллеров для повышений выработки энергии.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке исследовательского проекта BR28713563 Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан и выполнена в Казахском Национальном Университете имени аль-Фараби, что с благодарностью признано авторами.

REFERENCES

- 1 **Foley, A., Olabi, A. G.** Renewable energy technology developments, trends and policy implications that can underpin the drive for global climate change // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – P. 1112–1114. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.065>
- 2 **Ibati, A. G.** 100 % sustainable energy // Energy. – 2014. – Vol. 77. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.083>
- 3 **Seme, S. et al.** Dual-axis photovoltaic tracking system–Design and experimental investigation // Energy. – 2017. – Vol. 139. – P. 1267–1274. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.153>
- 4 **Khamooshi, M. et al.** A review of solar photovoltaic concentrators // International Journal of Photoenergy. – 2014. – № 1. – P. 958521. – <https://doi.org/10.1155/2014/958521>
- 5 **Sidek, M. H. M. et al.** Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control // Energy. – 2017. – Vol. 124. – P. 160–170. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.001>
- 6 **Njoku, H. O.** Upper-limit solar photovoltaic power generation: Estimates for 2-axis tracking collectors in Nigeria // Energy. – 2016. – Vol. 95. – P. 504–516. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.078>
- 7 **Yilmaz, U., Turksoy, O., Teke, A.** Improved MPPT method to increase accuracy and speed in photovoltaic systems under variable atmospheric conditions // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Vol. 113. – P. 634–651. – <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.074>
- 8 **Lazaroiu, G. C. et al.** Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption // Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol. 92. – P. 143–148. – <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.046>
- 9 **Seyedmahmoudian, M. et al.** State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems–A review

// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol 64. – P. 435–455.
– <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.053>

10 Kulaksiz, A. A., Akkaya, R. Training data optimization for ANNs using genetic algorithms to enhance MPPT efficiency of a stand-alone PV system // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2012. – Vol. 20. – № 2. – P. 241–254. – <https://doi.org/10.3906/elk-1101-1051>

11 Asowata, O. et al. Optimizing the output power of a stationary PV panel // Proceedings of the Southern Africa Telecommunications Networks and Applications Conference (SATNAC), Stellenbosch, South Africa. – 2013.

Поступило в редакцию 07.03.25

Поступило с исправлениями 04.07.25

Принято в печать 05.09.25

**Н. Б. Құттыбай¹, Д. К. Сыбанбаева², С. О. Орынбасар³,*

А. А. Каппарова⁴, А. Б. Болатбек⁵

^{1,2,3,4,5}Эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

07.03.25 ж. баспаға түсті.

04.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФОТОЭЛЕКТРЛІК ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ШЫҒЫС ҚУАТЫНА ӘРТҮРЛІ КОНТРОЛЛЕРДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада фотоэлектрлік қондырғылардың әртүрлі конфигурацияларына қатысты екі түрлі контроллердің, максималды қуат нүктесін бақылау (МҚНБ) жүйелері мен ендік импульстік модуляцияға (ЕИМ) негізделген контроллерлердің өнімділігіне салыстырмалы баға беріледі. Талдау стационарлық күн панельдерін, сондай-ақ күн қозғалысын бір осьті және екі осьті бақылау механизмдерімен жабдықталған жүйелерді қамтиды. Зерттеудің мақсаты – қымбат МҚНБ-контроллерлерін қолжетімді ЕИМ-контроллерлермен алмастыру жалпы энергетикалық тиімділікке айтарлықтай әсер етпейтін жағдайларда орынды болуы мүмкін деген гипотезаны тексеру. Контроллерлердің жұмысындағы айырмашылықтарды бағалау үшін статистикалық әдістер: Стьюдент критерийі мен Колмогоров–Смирнов критерийі қолданылды. Нәтижелер көрсеткендей, стационарлық фотоэлектрлік жүйелер жағдайында контроллерлер арасындағы тиімділік

айырмашылықтары статистикалық тұрғыдан маңызсыз ($p > 0.05$), бұл өнімділікке зиян келтірмей, күрделі шығындарды азайтуға мүмкіндік бар екенін білдіреді. Алайда трекерлермен жабдықталған жүйелерде МҚНБ-контроллерлердің тиімділігі едәуір жоғары болып шықты, бұл p мәндерінің төмен болуымен ($p < 0.05$) расталды және сенімді айырмашылықтарды көрсетеді. Осылайша, қандай контроллер түрін қолданудың орынды екендігі жүйе архитектурасына байланысты екені анықталды. Егер стационарлық жүйелерде қарапайым ЕИМ-контроллерлерді қолдануға тиімді болса, трекерлерде оларды пайдалану энергия өндірісінің төмендеуіне әкеледі. Алынған қорытындылар күн энергетикалық қондырғыларын жобалау мен оңтайландыруда «шығын – тиімділік» арақатынасын ескере отырып, практикалық маңызға ие.

Кілтімі сөздер: фотоэлектрлік қондырғылар, МҚНБ-контроллер, ЕИМ-контроллер, статистикалық талдау, энергетикалық тиімділік.

*N. B. Kuttybay¹, D. K. Sybanbayeva², S. O. Orynassar³,

A. A. Kapparova⁴, A. B. Bolatbek⁵

^{1,2,3,4,5}al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 07.03.25.

Received in revised form 04.07.25.

Accepted for publication 05.09.25.

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF CONTROLLER TYPES ON THE OUTPUT POWER OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

The article presents a comparative assessment of the performance of two types of controllers: Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems and Pulse-Width Modulation (PWM)-based controllers, in relation to various configurations of photovoltaic (PV) systems. The analysis covers both fixed solar panels and systems equipped with single-axis and dual-axis solar tracking mechanisms. The aim of the study was to test the hypothesis that replacing costly MPPT controllers with more affordable PWM controllers may be justified if the impact on overall energy efficiency is minimal. To evaluate the performance differences between the controllers, statistical methods were employed, including the Student's T-test and the Kolmogorov–Smirnov test. The results showed that in fixed PV systems, there were no statistically significant differences in efficiency between the controllers ($p > 0.05$ for both tests), suggesting the potential for reducing capital costs without compromising performance. However, in tracking

systems, MPPT controllers demonstrated significantly higher efficiency, as evidenced by low p-values ($p < 0.05$), indicating meaningful differences. Therefore, it was established that the suitability of a given type of controller depends on the system architecture. While simpler PWM controllers may be acceptable for fixed installations, their use in tracking systems leads to energy yield losses. The findings have practical implications for the design and optimization of solar energy systems, taking into account the cost-to-efficiency ratio.

Keywords: photovoltaic systems, MPPT controller, PWM controller, statistical analysis, energy efficiency.

Теруге 09.09.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4447

Сдано в набор 09.09.2025 г. Подписано в печать 30.09.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4447

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz