

Forecasting the electricity generation of solar power plants

Zh. Omirbek*, Ye. Khidolda

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: omirbekzhandos@yandex.kz

Abstract. Modern methods of forecasting and the actual basis for its implementation are analyzed. To predict the production of electricity using solar power plants (SES), data on long periods of operation of stations in the past are used. This data is processed using statistical methods and machine learning methods to obtain forecasts of the stations' performance in the future. The currently accepted methods of forecasts are given, which allow us to evaluate errors and compare the effectiveness of various forecasting methods. An example of the SES performance forecast using the PV System software product is given.

Keywords: solar power plants, forecast of electricity generation, classification of forecasting methods, solar panels, efficiency.

1. Введение

Энергетическая индустрия играет решающую роль в формировании экономической динамики каждой страны. Чтобы преодолеть долгосрочные вызовы в области энергетики, с которыми сталкивается вся человеческая цивилизация, необходимо уделить приоритетное внимание разработке солнечных технологий. В передовых государствах важнейшим направлением становится создание систем, использующих возобновляемые источники энергии, включая солнечную энергию. Казахстан обладает огромным потенциалом в этой области благодаря своему климату с обилием солнечного света и редкой облачностью в большей части страны. По оценкам экспертов, потенциал солнечной энергии в Казахстане составляет потенциальные 3.9 триллиона кВт·ч в год.

В настоящее время Казахстан активно воплощает амбициозные планы в развитии солнечной энергетики и уже построены несколько десятков крупных солнечных электростанций по всей стране. Однако наиболее интересной перспективой является возможность разработки солнечных энергетических проектов на севере страны, где зимой характерны низкие температуры и сокращенное количество солнечных часов. Прогнозирование производства электроэнергии от солнечных электростанций в Казахстане стоит перед вызовом превращения страны в одного из лидеров в области возобновляемых источников энергии. Этот прогноз строится на анализе данных о погодных условиях, таких как солнечное излучение, температура, облачность, скорость ветра и другие переменные, которые могут оказать влияние на работу солнечных электростанций. Эти данные обрабатываются специализированными алгоритмами для точного прогноза объема производства энергии солнечными установками в будущем.

Интеграция солнечных электростанций в энергетическую систему вводит дополнительные пласты сложности, которые требуют учета при обеспечении баланса между производством и потреблением электроэнергии. Этот баланс является неотъемлемой частью поддержания ста-

бильной частоты в энергосистеме, оптимальной работы других источников генерации, а также участия в электро-энергетическом рынке. По мере увеличения доли солнечных электростанций в системе, неопределенность в генерации электроэнергии из солнечных источников становится существенным фактором, и сокращение необходимых резервов для компенсации этой неопределенности становится стратегической задачей для максимизации преимуществ использования солнечной энергии.

2. Методы и материалы

2.1. Современные методы прогноза производительности СЭС

Существующие методы прогнозирования генерации электрической энергии с помощью солнечных электростанций можно классифицировать в четыре основные категории (рисунок 1), каждая из которых представляет собой уникальный подход:

1) Физические модели углубляются в физические взаимосвязи между погодными условиями и солнечной радиацией, основанными на численных прогнозах погоды. Эти модели используются для предсказания выработки электроэнергии на солнечных станциях, учитывая разнообразные физические факторы.

2) Статистические модели сосредотачивают внимание на связи между интенсивностью солнечного излучения, полученной из численных прогнозов погоды, и производством электроэнергии на солнечных станциях. В данном случае физические факторы не рассматриваются, и модель основывается исключительно на статистическом анализе временных рядов и исторических данных.

3) Адаптивные модели применяют системы искусственного интеллекта для выявления связей между прогнозируемыми погодными условиями и выходной мощностью электростанции. Эти модели обучаются на основе имеющихся данных и способны адаптироваться к

изменяющимся условиям, делая их более гибкими и точными.

4) Гибридные модели представляют собой комбинацию физических и статистических подходов. Они объединяют в себе лучшие аспекты обоих методов, что позволяет учесть, как физические факторы, так и статистические зависимости, делая прогнозы более надежными и адаптивными.

Каждая из этих категорий методов имеет свои сильные стороны и области применения. Выбор конкретного метода зависит от целей прогнозирования и доступных данных. Постоянное усовершенствование этих методов играет важную роль в повышении эффективности солнечных электростанций и улучшении точности прогнозов генерации солнечной энергии.

2.1.1. Физические модели

Физические модели в прогнозировании выработки энергии солнечными электростанциями представляют собой математические модели, которые основываются на физических принципах и законах, описывающих процессы взаимодействия солнечного излучения с фотоэлектрическими элементами солнечных панелей. Эти модели учитывают сложные оптические и электрические процессы, которые происходят при конвертации солнечного излучения в электрическую энергию. Важными элементами физических моделей являются учёт геометрических параметров, таких как угол инцидентного солнечного излучения, который зависит от географического расположения солнечной электростанции и времени суток. Также учитываются параметры окружающей среды, такие как температура воздуха, которые могут влиять на эффективность работы солнечных панелей. Дополнительно, физические модели учитывают характеристики самих солнечных панелей, такие как их эффективность и максимальную выходную мощность. Путем комбинирования всех этих факторов и использования математических уравнений модель может предсказать, сколько электроэнергии будет произведено солнечной электростанцией в конкретных климатических условиях. Это позволяет оптимизировать работу станции, учитывая разнообразные физические параметры, и делает физические модели важными инструментами в планировании и управлении солнечными электростанциями.



Рисунок 1. Классификация методов прогнозирования солнечной электростанций

2.1.2. Статистические модели

Статистические модели в прогнозировании выработки энергии солнечными электростанциями основываются на анализе статистических данных и временных рядов, связанных с солнечной радиацией и выработкой электроэнергии. Эти модели не требуют глубокого понимания физических процессов, а вместо этого оценивают статистические зависимости между интенсивностью солнечного излучения и производством электроэнергии. В ходе анализа используются методы временных рядов и статистические техники, такие как регрессионный анализ, что позволяет прогнозировать будущую выработку энергии на основе исторических данных и прогнозов погоды. Эти модели обычно более просты в реализации по сравнению с физическими моделями и могут быть полезными для краткосрочных и среднесрочных прогнозов выработки электроэнергии солнечными электростанциями.

2.1.3. Регрессионные методы

Метод линейной регрессии применяется в прогнозировании выработки энергии солнечными электростанциями для оценки линейной зависимости между различными предикторами, такими как интенсивность солнечной радиации, метеорологические параметры и время суток, и фактической выработкой электроэнергии. Модель линейной регрессии может быть представлена следующей формулой (1)

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n + E, \quad (1)$$

где Y - электроэнергия солнечной электростанции; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ - коэффициенты регрессии, которые оцениваются моделью; $X_1, X_2, \dots, X_n$ - предикторы (например, интенсивность солнечной радиации, температура, время суток); E - случайная ошибка.

Целью метода линейной регрессии является подбор коэффициентов $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов остатков (разницы между фактической и предсказанной выработкой). Полученная модель может быть использована для прогнозирования выработки электроэнергии на основе новых значений предикторов, что помогает оптимизировать работу солнечной электростанции и планировать производство электроэнергии в зависимости от погодных условий и времени суток.

2.2. Методы, основанные на временных рядах

Прогнозирование выработки солнечных электростанций с использованием методов, основанных на временных рядах, играет ключевую роль в оптимизации производства энергии из солнечных источников. Для этого применяются различные алгоритмы и модели, такие как ARIMA (авторегрессионная интегрированная скользящая средняя), LSTM (долгая краткосрочная память) и другие методы машинного обучения, которые анализируют исторические данные солнечной активности и погодных условий, чтобы точно предсказать будущую выработку солнечной энергии. Это позволяет эффективно управлять солнечными электростанциями и интегрировать солнечную энергию в энергетическую сеть, улучшая устойчивость и экономическую эффективность использования солнечных ресурсов.

2.2.1. Адаптивные модели

Адаптивные модели в прогнозировании выработки энергии солнечных электростанций представляют собой современный подход, который учитывает изменчивость и динамику в процессе генерации солнечной энергии. Эти модели могут включать в себя алгоритмы машинного обучения, такие как рекуррентные нейронные сети (RNN) или сверточные нейронные сети (CNN), а также методы адаптивного управления, которые реагируют на изменения в солнечной активности и метеорологических условиях в реальном времени. Это позволяет повысить точность прогнозов и эффективность использования солнечной энергии, что особенно важно в контексте интеграции возобновляемых источников энергии в энергетические сети.

2.2.2. Гибридные модели

Гибридные модели в прогнозировании выработки энергии солнечных электростанций объединяют различные методы и подходы для более точных и надежных прогнозов. Эти модели могут комбинировать в себе статистические методы, такие как ARIMA, с машинным обучением, включая нейронные сети или методы глубокого обучения. Такой подход позволяет учесть, как краткосрочные, так и долгосрочные тренды в данных, а также адаптироваться к изменчивым условиям солнечной генерации. Гибридные модели играют важную роль в оптимизации управления солнечными электростанциями и улучшении прогнозов, что способствует эффективному использованию солнечной энергии и интеграции ее в энергетическую инфраструктуру.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Прогноз производительности СЭС с помощью программного продукта PV Syst

PV Syst - это программное обеспечение для проектирования и моделирования фотоэлектрических систем, включая солнечные электростанции. Оно используется для расчета производительности СЭС и прогнозирования выработки электроэнергии на основе данных о погоде и характеристик СЭС. С помощью PV Syst можно создавать 3D-модели солнечных панелей, проводить технические расчеты, моделировать производительность СЭС и создавать прогнозы выработки электроэнергии на основе различных метеорологических данных. Программное обеспечение PV Syst имеет множество функций для прогнозирования выработки электроэнергии от СЭС. В ней можно моделировать геометрических параметров солнечных панелей, таких как угол наклона и направление. Также программа позволяет моделировать производительность солнечных панелей на основе их технических характеристик. После моделирования можно произвести расчет потерь энергии в системе СЭС, включая потери энергии во время транспортировки и хранения. Рассмотрим процесс моделирования PV Syst на примере солнечной электростанции с мощностью 3кВт расположенной на территории Satpayev University.

СЭС состоит из следующих оборудования:

1) Монокристаллическая солнечная панель JinkoSolar JKM-525M-72HL4-BDVP, максимальная мощность 525 Вт, количество 6 шт.;

2) Invertor Sungrow SG3.ORS, мощность 3 кВт, рабочее напряжение 40-560 В, максимальное напряжение 600В – 1 шт.;

3) AGM аккумулятор Ventura 100 А*ч, напряжение 12 В - 8шт.

Схема подключения СЭС представлено на рисунке 2.

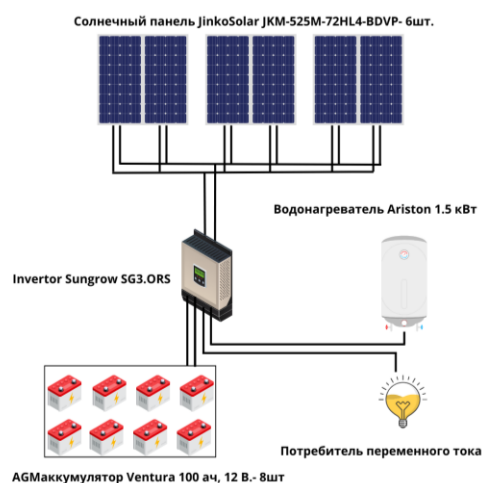


Рисунок 2. Схема подключения СЭС

Процесс моделирования солнечной электростанции в программе PV Syst начинается с выбора местоположения установки. Изображение окна выбора местности представлено на рисунке 3.

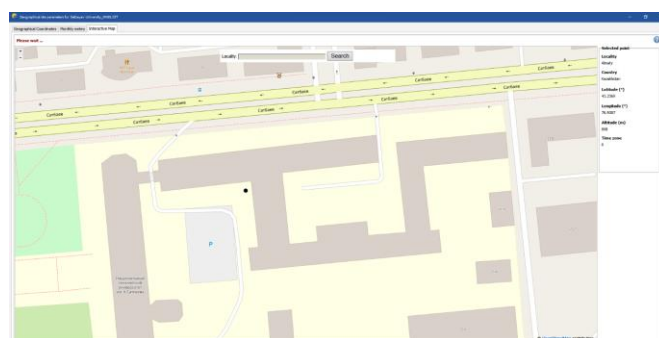


Рисунок 3. Выбор координат объекта в окне программы

Далее, производится загрузка метеорологических данных, включая информацию о солнечной радиации, температуре, скорости ветра и других климатических факторах, для более точного моделирования производства энергии. Программа предоставляет возможность увидеть, где находится Солнце в разные месяцы года, данный график показан на рисунке 4. Следующим этапом является определение характеристик компонентов системы, включая солнечные панели, инверторы и монтажные системы. После этого, PV Syst проводит детальную симуляцию работы СЭС на протяжении года, учитывая сезонные и климатические изменения, что позволяет предсказать производство энергии (рисунки 5, 6). По завершении симуляции, PV Syst предоставляет подробные результаты, включая оценку производства энергии, финансовые показатели, такие как окупаемость проекта, и другие ключевые характеристики работы СЭС. Эти данные можно использовать для принятия решений о проекте и создания отчетов для заказчиков, инвесторов или регуляторных органов. PV Syst также предоставляет инструменты для мониторинга и управления СЭС после внедрения в эксплуатацию, что обеспе-

чивает более эффективное использование солнечной энергии.

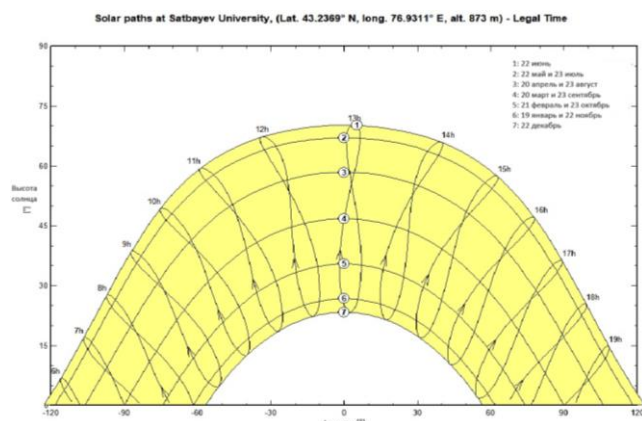


Рисунок 4. Путь Солнца в разные месяцы года

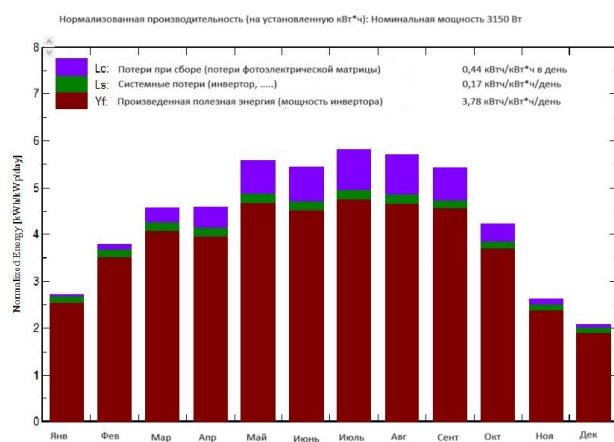


Рисунок 5. Нормализованная производительность

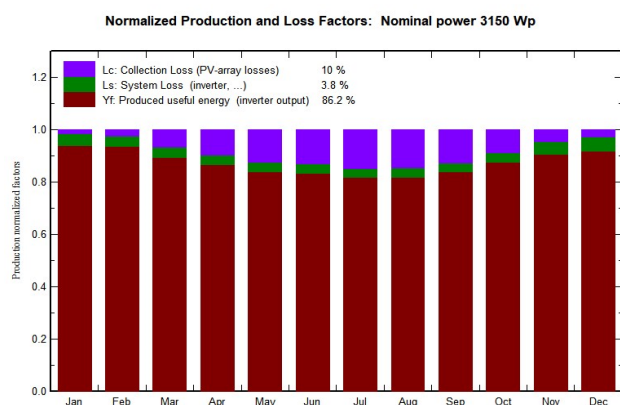


Рисунок 6. Нормализованная производительность и потери в процентах

Анализируя отчета из PV Syst для данной электростанции, мы наблюдаем что КИУМ (коэффициент использования установленной мощности) данной системы составляет 86.2%.

Формула расчета КИУМ может быть представлена в следующем виде (2).

$$КИУМ = \frac{Y_f}{Y_r} * 100\% , \quad (2)$$

где, Y_r – эталонный показатель выработки (кВт*ч/кВтпик); Y_f – фактический показатель выработки (кВт*ч/кВтпик).

Это процент электроэнергии, который фактически выходит из инвертора и доступен для использования в электросети или для потребления внутри системы. Потери при сборе (10%) в солнечных панелях. Это обычно связано с различными физическими и электрическими потерями в солнечных панелях, включая отражение солнечного света, тепловые потери и потери из-за ненаправленного света. Важно обратить внимание, что эффективность солнечных панелей может снижаться с течением времени из-за факторов, таких как загрязнение и износ. Потери в системе (3.8%) включают потери в инверторе, связанные с эффективностью работы инвертора.

В данном случае, инвертор Sungrow SG3.ORS имеет эффективность преобразования, и поэтому часть солнечной энергии теряется в процессе преобразования постоянного тока в переменный. Потери в аккумуляторах: AGM аккумуляторы тоже имеют свои потери, связанные с зарядкой и разрядкой. Важно обеспечить правильное управление зарядом и разрядом аккумуляторов, чтобы минимизировать эти потери. Потери в кабелях и других компонентах: Эти потери могут быть связаны с сопротивлением проводов и другими электрическими потерями в системе.

Система имеет потери как на этапе сбора солнечной энергии в солнечных панелях, так и на этапе преобразования и хранения с помощью инвертора и аккумуляторов. Эффективность инвертора играет важную роль в общей эффективности системы. Для улучшения производительности и экономической эффективности, можно рассмотреть следующие шаги:

- Поддерживать солнечные панели в чистоте и в хорошем состоянии для минимизации потерь при сборе;
- Выбрать инвертор с более высокой эффективностью, если это возможно;
- Эффективно управлять зарядом и разрядом аккумуляторов;
- Убедиться в правильном проектировании и монтаже системы, чтобы минимизировать потери в кабелях и других компонентах.

Такие меры могут помочь увеличить общую эффективность и производительность солнечной электростанции.

4. Выводы

В данной статье мы исследовали различные методы прогнозирования выработки электроэнергии на солнечных электростанциях. Рассмотрели физические модели, которые основаны на фундаментальных принципах физики и метеорологии. Исследовали статистические модели, которые используют статистические алгоритмы для анализа и прогноза временных рядов данных солнечной активности и метеорологических условий.

Далее, мы рассмотрели адаптивные модели, которые способны адаптироваться к изменениям в окружающей среде и корректировать прогнозы в реальном времени. Гибридные модели, объединяющие различные методы, такие как статистические и физические модели, пред-

ставляют собой перспективный подход к повышению точности прогнозов.

В заключение, мы представили пример прогнозирования производительности СЭС с использованием программного продукта PV Syst. Этот инструмент предоставляет возможность точного моделирования работы солнечных электростанций, учитывая разнообразные факторы, такие как климатические условия и характеристики оборудования. Прогнозы, полученные с помощью PV Syst, могут служить основой для эффективного управления СЭС и оптимизации их производительности, что имеет важное значение для развития солнечной энергетики и устойчивого энергоснабжения.

References / Литература

- [1] Kenzhaev, T. (2017). Sostojanie i perspektivy razvitiya solnechnoj jenergetiki. *Molodoj uchenyj*, 37(171), 6–7. <https://moluch.ru/archive/171/45649/>
- [2] Tuohy, A., Zack, J., Haupt, S. E., Sharp, J.T., Ahlstrom, M., Dise, S., Grimit, E.P., Möhrle, C., Lange, M., Casado, M.G., Black, J., Marquis, M. & Collier, C. (2015). Solar Forecasting: methods, challenges, and performance. *IEEE Power & Energy Magazine*, 13(6), 50–59. <https://doi.org/10.1109/mpe.2015.2461351>
- [3] Kavasseri, R.G. & Sivaraman, K. (2009). Day-ahead wind speed forecasting using f-ARIMA models. *Renewable Energy*, 34(5), 1388–1393. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.009>
- [4] Kotov, A.S., Siveev, T.M., Gruzlov, A.G. & Pashkovskaja, E.E. (2022). Obzor metodov Prognozirovaniya generacii jenerгии. *Stolypinskij vestnik*, (9)
- [5] Tjun'kov, D.A., Sapilova, A.A., Gricaj, A.S., Alekseenko, D. A. & Hamitov, R.N. (2020). Metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vyrabotki jelektricheskoy jenerгии solnechnymi jelektrostancijami i ih klassifikacija. *Elektroteh-nicheskie sistemy i komplekсы*, (3 (48)), 4-10
- [6] Hidolda, E., Asylhan, A.A., Zhonkeshova, K.S. & Abdikalyk, N. (2021). Ocenka funkcional'noj jeffektivnosti solnechnoj jelektrostancii. *Vestnik Satbayev University*, (3), 76–84
- [7] Hidolda, E., Jurchenko, A.V. & Zhonkeshova, K.S. (2020). Modelirovanie jenergeticheskikh harakteristik fotojelek-tricheskoy paneli v Matlab/Simulink. *Vestnik Satbayev University*, (2), 553–559

Күн электр станцияларының электр энергиясын өндіруді болжау

Ж. Омирбек*, Е. Хидолда

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: omirbekzhandos@yandex.kz

Аңдатпа. Болжамның заманауи әдістері және оны жүзеге асырудың нақты негіздері талданады. Күн электр станцияларының (СЭС) көмегімен электр энергиясын өндіруді болжау үшін станциялардың бұрынғы ұзақ жұмыс кезеңдері туралы деректер пайдаланылады. Бұл деректер болашақта станциялардың өнімділігі туралы болжамдарды алу үшін статистикалық әдістер мен машиналық оқыту әдістерімен өңделеді. Қателіктерді бағалауға және әртүрлі болжау әдістерінің тиімділігін салыстыруға мүмкіндік беретін қазіргі уақытта қабылданған болжау әдістері берілген. PV Syst бағдарламалық өнімі арқылы СЭС өнімділігін болжаудың мысалы келтірілген.

Негізгі сөздер: күн электр станциялары, электр энергиясын өндіру болжамы, болжау әдістерінің жіктелуі, күн панельдері, тиімділік.

Прогнозирование выработки электроэнергии солнечных электростанций

Ж. Омирбек*, Е. Хидолда

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: omirbekzhandos@yandex.kz

Аннотация. Проанализированы современные методы прогноза и фактические основы для его проведения. Для прогнозирования производства электроэнергии с помощью солнечных электростанций (СЭС) используются данные о длительных периодах работы станций в прошлом. Эти данные обрабатываются с помощью статистических методов и методов машинного обучения, чтобы получить прогнозы производительности станций в будущем. Приведены принятые методы в настоящее время прогнозов, которые позволяют оценить ошибки и сравнить эффективность различных методов прогнозирования. Приведен пример прогноза производительности СЭС с помощью программного продукта PV Syst.

Ключевые слова: солнечные электростанции, прогноз выработки электроэнергии, классификация методов прогноза, солнечные панели, эффективность.

Received: 02 June 2024

Accepted: 15 September 2024

Available online: 30 September 2024