

УДК 621.311

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КРАТКОСРОЧНОГО И ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Георгиевский И.Д.<sup>1</sup> аспирант, 3 курс

Научный руководитель: Илюшин П.В.<sup>1</sup>, д.т.н, профессор

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва.

*Аннотация: в статье рассмотрены современные методы и средства прогнозирования мощности солнечных электростанций (СЭС). Рассмотрены особенности краткосрочного и оперативного прогнозирования, а также влияния стохастического характера выдачи мощности СЭС на надежность функционирования энергосистем. Особое внимание уделено вероятностным прогнозам и динамическому расчету резервов мощности, которые позволяют учитывать неопределенность выдачи мощности СЭС и минимизировать риски работы на оптовом рынке электроэнергии и мощности.*

*Ключевые слова: солнечная электростанция, прогнозирование мощности, численное прогнозирование погоды, вероятностный прогноз, динамическое резервирование мощности.*

### Введение

Развитие электроэнергетики связано с ростом доли электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в особенности ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС), в структуре генерирующих мощностей энергосистем. В России к 2035 г. планируется ввод ВЭС и СЭС суммарной мощностью свыше 12 ГВт. Увеличение доли ВЭС и СЭС снижает надежность функционирования энергосистем из-за возникновения мгновенных небалансов активной мощности, связанных со стохастическим характером ее выдачи в сеть. Это может приводить к аварийным отключениям генерирующего оборудования традиционных электростанций и потребителей. Для компенсации вероятностного характера выдачи мощности СЭС применяются меры по повышению гибкости энергосистем: повышение маневренности генерирующего оборудования традиционных электростанций, усиление межсистемных связей и применение систем накопления электроэнергии [1,2].

В ряде случаев наиболее эффективным является точное прогнозирование мощности СЭС (на сутки вперед; шесть часов вперед). Это позволяет оптимизировать резервные мощности на традиционных электростанциях и корректировать диспетчерские графики, что важно в энергосистемах с высокой долей СЭС, недостаточными резервами мощности и ограниченной пропускной способностью межсистемных линий электропередачи [3].

## Подходы к прогнозированию мощности СЭС

Основой прогнозирования мощности СЭС является оценка освещенности фотоэлектрических модулей с учетом состояния атмосферы: облачности, аэрозолей в воздухе, температуры окружающей среды и др. Наибольшую неопределенность в прогнозах вызывает движение облаков, которое отслеживается с помощью инструментов наземной и спутниковой съемки. Для точного прогнозирования могут применяться различные методы.

Физические методы используют численное прогнозирование погоды (ЧПП) и физические модели СЭС, учитывающие характеристики генерирующего оборудования и условия местности размещения СЭС. Они применяются на горизонте от 6 часов до 2 недель.

Статистические методы строят прогнозы на основе исторических данных о прогнозе погоды, используя регрессионные модели и нейронные сети. Они имеют высокую эффективность на горизонте прогнозирования до 6 часов [4].

Гибридные методы комбинируют физические и статистические модели для учета локальных условий и неопределенностей. Ансамбли моделей объединяют несколько методов, что повышает точность и позволяет учитывать экстремальные погодные явления. Например, один из подходов – аналоговый ансамбль, корректирующий прогнозы на основе прошлых ошибок.

На рисунке 1 все методы прогнозирования разделены на категории, в зависимости от временного и пространственного горизонта, на котором они эффективны: 1 – статистические методы; 2 – численное прогнозирование погоды; 3 – спутниковое зондирование; 4 – анализ снимков неба.

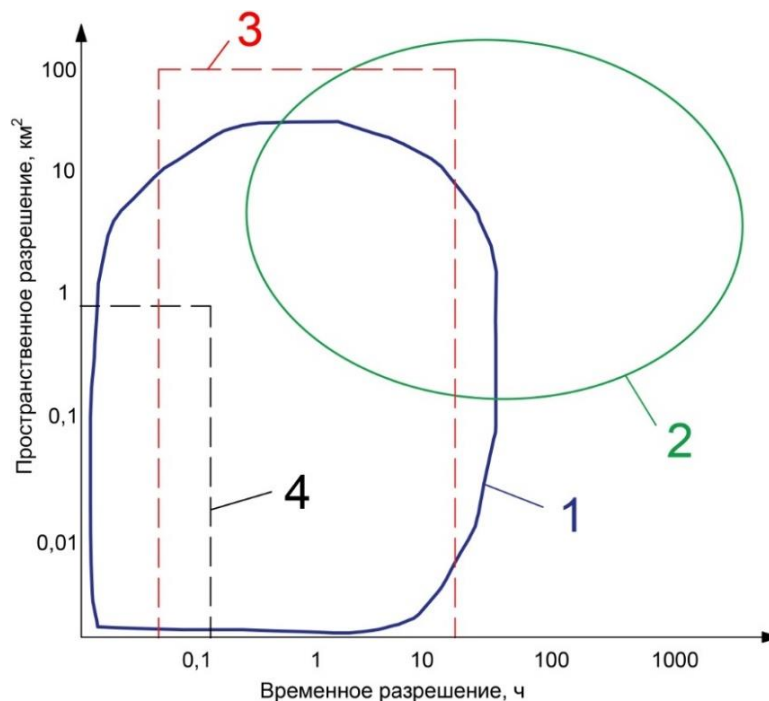


Рисунок 1 – Диаграмма пространственно-временного распределения методов прогнозирования мощности СЭС

### Краткосрочное прогнозирование (на сутки вперед)

Прогнозирование мощности СЭС с использованием ЧПП включает два ключевых этапа: определение начального состояния атмосферы на основе данных с космических спутников, наземных станций наблюдения и радиозондов, а также интеграцию уравнений атмосферной динамики во времени. Эти уравнения описывают процессы радиационного переноса, динамику воздушных потоков и микрофизику облаков. Среди наиболее точных глобальных моделей ЧПП выделяются ECMWF (Integrated Forecasting System, IFS) и GFS (Global Forecast System). Модель ECMWF, разработанная Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды, характеризуется высоким временным и пространственным разрешением, что обеспечивает её эффективность в прогнозировании тонкослойных облаков, что критически важно для оценки поступления солнечной радиации. Модель GFS, разработанная Национальными центрами экологического прогнозирования (NCEP, США), обладает меньшим пространственным разрешением (около 50 км) и доступна бесплатно, однако её точность ниже по сравнению с ECMWF.

Помимо глобальных моделей находят применение региональные модели, которые обеспечивают более высокое пространственно-временное разрешение и точность прогнозов за счет усреднения данных по множеству метеорологических станций в регионе. Например, венгерская мезомасштабная модель AROME обеспечивает прогнозы с временным горизонтом до 48 часов и разрешением 2,5 км с шагом в 15 минут.

Точность прогнозов ЧПП зависит от параметризации ключевых процессов, таких как образование облаков, турбулентный перенос, микрофизические процессы и фракция облачного покрова. Различия в методах параметризации между моделями приводят к различиям в результатах прогноза. Ошибки в прогнозировании поступления солнечной радиации обусловлены как неточностями в инициализации модели, так и ограниченной пространственной детализацией расчетной сетки.

Источники ошибок можно разделить на две группы: связанные с облаками и не связанные с ними. В условиях ясного неба ошибки возникают из-за недооценки поглощения водяного пара, а также неточного учета озона и аэрозолей. В условиях облачности ошибки часто связаны с неправильной оценкой плотности облаков, их вертикального перекрытия и распределения по высотам. Определение причин этих ошибок затруднено из-за сложных взаимодействий между физическими процессами в атмосфере.

Для получения точных прогнозов важно качество данных наблюдений солнечной радиации, что требует широкого географического охвата от измерительных систем и высокой частоты измерений. Это, в свою очередь, предъявляет высокие требования к вычислительной мощности серверов.

### **Оперативное прогнозирование (до 6 часов вперед)**

Прогнозирование поступления солнечной радиации на горизонте до 6 часов вперед эффективно осуществляется с использованием статистических методов в сочетании с данными наземных камер обзора неба, пиранометров и

спутникового мониторинга облачного покрова. Основную сложность представляет частичная облачность, оказывающая существенное влияние на поступление солнечной радиации. Облака классифицируются по толщине, скорости движения и размеру, что определяет амплитуду колебаний мощности: перистые облака пропускают больше света и перемещаются медленно, тогда как плотные кучевые облака вызывают резкие изменения мощности. Медленные низкие облака вызывают резкие изменения мощности, а быстрые высокие облака приводят к более плавным ее колебаниям.

Корреляция поступления солнечной радиации между соседними СЭС снижается по мере увеличения расстояния, что указывает на статистическую независимость изменения облачности на больших территориях. Анализ точности прогнозов показал, что для отдельной СЭС мощностью 100 МВт нормализованная среднеквадратичная ошибка прогнозов на сутки и на час вперед составляет 22% и 17% соответственно. В тоже время для сети СЭС суммарной мощностью 64,5 ГВт эти ошибки значительно ниже – 4% и 2%, что объясняется эффектом пространственного сглаживания, который уменьшает амплитуду колебаний суммарной мощности благодаря независимому изменению облачности на больших географических территориях [5].

#### *Наземное наблюдение неба*

Для внутричасового прогнозирования инсоляции (до 30 минут) эффективно использовать наземные камеры обзора неба, которые с помощью сферического зеркала создают изображения небосвода под углом 180°. Это позволяет оценивать высоту облаков, их скорость и направление движения, делая снимки каждые 30 с. На этой основе рассчитываются тени облаков на земле, что позволяет определить затененные и незатененные участки [6].

Альтернативными инструментами оценки солнечной радиации являются пиранометры – для измерения суммарной горизонтальной радиации, пиргелиометры – прямой нормальной радиации, и радиометры – имеющие вращающуюся теневую полосу для всех трех компонентов освещенности.

Кроме того, для измерения облаков используют облакомеры, измеряющие высоту основания облаков над определенной точкой. Спутниковая съемка позволяет оценивать высоту верхней части облаков, но ее точность зависит от данных о температурных профилях атмосферы. Радиозонды обеспечивают детализированные вертикальные профили облаков, однако данные обновляются каждые 12 часов, что ограничивает оперативность измерений. Для повышения точности используется стереографическая съемка с двух точек, что позволяет рассчитать высоту облаков методом триангуляции. Скорость и направление движения облаков определяются с помощью нормализованной взаимной корреляции, анализируя последовательные снимки неба. Изображения разбиваются на фрагменты, смещение которых формирует векторное поле, описывающее изменения положения облаков.

#### *Гидрометеорологические космические спутники Земли*

Гидрометеорологические спутники оснащены датчиками для измерения солнечной радиации в коротковолновом и инфракрасном диапазонах.

Прогностические модели используют предположение о том, что видимое излучение Земли, наблюдаемое со спутника, пропорционально прозрачности облаков и косинусу зенитного угла Солнца. То есть, чем ярче Земля выглядит со спутника, тем ниже освещенность ее поверхности [7].

Освещенность поверхности Земли при ясном небе зависит от зенитного угла Солнца, высоты над уровнем моря, содержания озона и аэрозолей в атмосфере. Зенитный угол и высота над уровнем моря определяют длину пути солнечного излучения в атмосфере, что влияет на его рассеяние и поглощение. Зеркальная отражательная способность поверхности (альбедо) меняется в зависимости от угла между Солнцем и спутником, особенно над засушливыми районами, океанами и снежными поверхностями.

Снимки с геостационарных спутников используются для прогнозирования облачности на временном горизонте от нескольких минут до 10 часов. Прогнозирование проводится в два этапа: сначала рассчитывается освещенность при ясном небе, затем учитывается облачность по спутниковым данным. Метод эффективен, но теряет точность при быстром формировании или рассеивании облаков. Примером могут служить американские спутники GOES-R, оснащенные датчиком Advanced Baseline Imager (ABI), который обеспечивает 16 узкополосных каналов в диапазоне от 0,47 до 13,3 мкм, что позволяет получать данные с высоким спектральным, временным и радиометрическим разрешением, необходимым для точного прогнозирования поступления солнечной радиации.

### **Влияние прогнозирования мощности СЭС на энергосистему**

Оперативное и краткосрочное прогнозирование мощности СЭС имеют решающее значение для оптимизации затрат на рынке на сутки вперед и балансирующем рынке электроэнергии. Точные прогнозы снижают потребность в регулировочных мощностях на традиционных электростанциях, как это показывает опыт энергосистем Германии и Бельгии. Там высокая точность прогнозирования мощности СЭС позволила минимизировать расходы на корректировку режимов работы традиционных электростанций.

В европейских странах прогнозы мощности СЭС обязательны для каждого временного интервала в рамках рынка электроэнергии и мощности на сутки вперед, что позволяет системным операторам планировать и балансировать спрос и предложение. После подачи прогнозов на сутки вперед системные операторы используют оперативное прогнозирование для корректировки данных о выдаче мощности в реальном времени при изменении погодных условий в районах размещения СЭС.

В энергосистемах с высокой долей СЭС требуется выполнение динамического расчета резервов мощности на основе прогнозов мощности СЭС. Это позволяет гибко изменять объем резервирования, в зависимости от погодных условий и нагрузки, сокращая объем резервов мощности и повышая экономическую эффективность энергосистемы в целом [8].

Для повышения точности прогнозов все чаще применяются вероятностные прогнозы, которые учитывают неопределенность в виде распределения вероятностей. Традиционно прогнозы выдают одно значение для каждого горизонта прогноза, которое называется детерминированным или точечным прогнозом, как показано на рисунке 2. Такой подход не даёт информации о верхней и нижней границе прогнозов мощности СЭС или о вероятности возникновения для каждого из возможных значений.

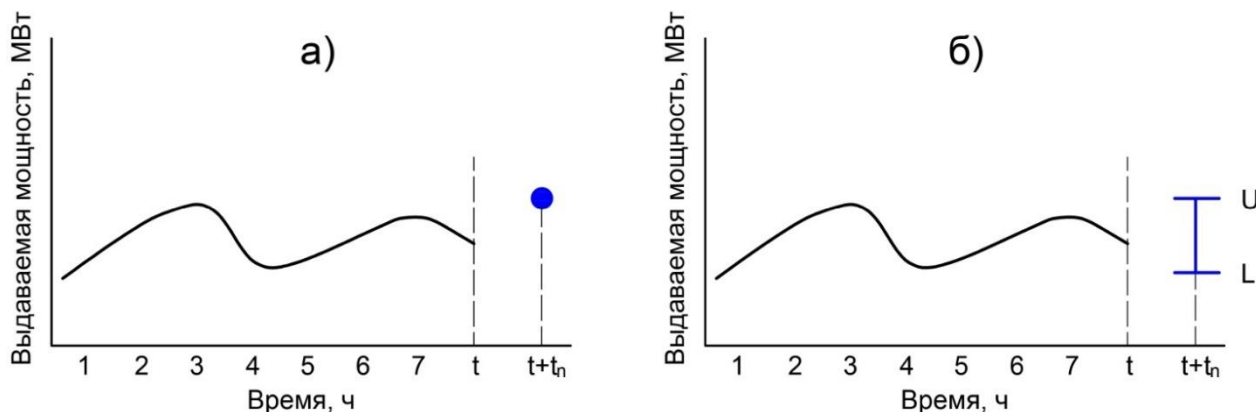


Рисунок 2 – Сравнение принципов прогнозирования:  
а) детерминированный; б) вероятностный

Вероятностные прогнозы подразделяются на параметрические и непараметрические. Параметрические предполагают априорное распределение случайных величин (например, нормальное), тогда как непараметрические используют квантили, интервалы неопределенности и оценки плотности ядра, что позволяет учитывать асимметрию распределения [9].

Всё чаще системные операторы внедряют системы оповещения о возможных скачках выдаваемой мощности СЭС. Например, системный оператор Техаса ERCOT заключил контракт с компанией AWS Truepower на разработку и внедрение системы оповещения Large Ramp Alert System (ELRAS), предназначенной для повышения ситуационной осведомленности системного оператора, предоставляя информацию о вероятности и величине колебаний ветра в течение следующих 6 часов. Такой инструмент может помочь системному оператору оценивать уровень риска возникновения нештатных ситуаций в энергосистеме и заранее планировать необходимые мероприятия для предотвращения нежелательных режимов работы энергосистемы [11].

На рынке электроэнергии Австралии системный оператор использует вспомогательные службы регулирования частоты (FCAS) для балансирования спроса и предложения. Ошибки в прогнозах мощности СЭС приводят к дополнительным затратам на корректировку частоты, которые распределяются среди владельцев СЭС пропорционально вкладу в дисбаланс, что стимулирует повышение точности прогнозов [10]. В Германии точные прогнозы способствуют поддержанию баланса мощности и оптимизации работы подстанций, содействуя минимизации локальных перегрузок оборудования в

распределительных сетях. В Калифорнии используется механизм подачи заявок с отрицательными ценами, что позволяет гибко управлять избытком мощности СЭС и стимулирует потребление в периоды пиковой выработки.

### Выводы

Краткосрочное и оперативное прогнозирование мощности СЭС является ключевым элементом их эффективной работы в составе энергосистем. Комплексный подход, объединяющий современные методы ЧПП, данные спутникового и наземного наблюдения, а также интеграцию физических и статистических моделей, позволяет повысить точность прогнозирования поступления солнечной радиации. А это позволяет исполнять диспетчерский график на сутки вперед с минимальными корректировками, что содействует технической и экономической эффективности энергосистем в целом.

Международный опыт показывает, что интеграция передовых методов прогнозирования мощности СЭС в диспетчерские и рыночные механизмы способствует снижению неопределенности выдачи мощности, повышению надежности энергоснабжения потребителей и минимизации финансовых рисков, связанных с балансированием мощности в энергосистемах. Вероятностные прогнозы и динамический расчет резервов мощности способствуют гибкому управлению энергосистемой в условиях высокой доли объектов ВИЭ, а также повышают экономическую эффективность эксплуатации как СЭС, так и традиционных электростанций.

### Список литературы

1. Воропай Н. И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. – 2020. – № 7. – С. 12 - 21.
2. Илюшин П. В., Георгиевский И. Д. Обзор возможностей для увеличения доли ветровых и солнечных электростанций в структуре генерирующих мощностей энергосистем // Энергетик. – 2023. – № 5. – С. 13-18.
3. Ilyushin P. V., Filippov S. P., Shepvalova O. V., Nekrasov A. A. Calculating the sequence of stationary modes in power distribution networks of Russia for wide-scale integration of renewable energy based installations // Energy Reports. 2021. T. 7. № Suppl. 5. С. 308-327.
4. Киселева С. В., Лисицкая Н. В., Фрид С. Е. Прогнозирование выработки солнечных станций и фотоэлектрических установок: основные подходы и результативность // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 7-18 (330-341). – С. 24-43.
5. Pedro H. T. C., Coimbra C. F. M. Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs // Solar Energy. – 2017. – Vol. 86. – Iss. 7. – pp. 2017-2028.

6. Concept Consulting Group Limited. Intermittent generation forecasting arrangements – review of international jurisdictions. Prepared for the Electricity Authority. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3DzeH9>.

7. Yang D. A review of solar forecasting, its dependence on atmospheric sciences and implications for grid integration: Towards carbon neutrality / D. Yang, W. Wang, C. Gueymard, T. Hong, J. Kleissl, etc // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 161. 112348.

8. Кучеров Ю.Н., Березовский П.К., Веселов Ф.В., Илюшин П.В. Анализ общих технических требований к распределённым источникам энергии при их интеграции в энергосистему // Электрические станции. – 2016. – № 3. – С. 2-10.

9. Li B. A review on the integration of probabilistic solar forecasting in power systems / B. Li, J. Zhang // Solar Energy. – 2020. – Vol. 210. – P. 68-86.

10. Zsiboracs H., G. Pinter, A. Vincze, Baranyai N. H. The reliability of photovoltaic power generation scheduling in seventeen European countries // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 260.

11. Antonanzas J. Review of photovoltaic power forecasting / J. Antonanzas, N. Osorio, R. Escobar, R. Urraca, F. J. Martinez-de-Pison, F. Antonanzas-Torres // Solar Energy. 2016. Vol. 136. P. 78-111.