

Национальный Исследовательский Университет
«Московский Энергетический Институт»



Кафедра ГВИЭ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ВЕТРОВЫХ И
СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ
ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Аспирант НИУ «МЭИ»: Георгиевский И.Д.
Научный руководитель: д.т.н. Илюшин П.В.

Цель исследования

- Совокупная мощность ВЭС и СЭС в ЕЭС России $\approx 5,13$ ГВт (1,9% от ген. мощн.)
- Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2042 г. планируется увеличить мощность до 21,9 ГВт (до 7,3% от ген. мощн.)
- В некоторых энергосистемах доля ВЭС и СЭС занимает значительное место: Калмыкия - 92%, Астраханская обл. - 33,6% (по итогам 2023 г.)
- ❑ Характерно отсутствие гарантированной мощности, стохастический характер выработки электроэнергии и малая инерционность при изменении режима
- ❑ Возникновение мгновенных небалансов мощности
- ❑ Отключение генерирующих установок традиционных электростанций и потребителей электроэнергии действием защит

Один из наиболее эффективных инструментов решения данной проблемы –
применение систем прогнозирования мощности ВЭС и СЭС

Методы прогнозирования выработки электроэнергии

Ключевые параметры для прогнозирования:

- ВЭС - скорость, направление и турбулентность ветра, а также плотность, температура и давление воздуха
- СЭС - уровень солнечной радиации, облачность, аэрозольный индекс, а также температура воздуха и фотоэлектрических модулей

Три основных подхода:

- Физический: основан на численных прогнозах погоды (ЧПП) и их преобразовании в ожидаемую мощность по техническим характеристикам ВЭС и СЭС. Обеспечивают высокую точность, но требуют больших вычислительных мощностей.
- Статистический: анализируются архивные данные для выявления зависимости между погодными условиями и мощностью ВЭС и СЭС. Менее ресурсоёмки, но менее точны на больших горизонтах прогнозирования. Зачастую применяются интеллектуальные методы и измерительные инструменты.
- Комбинированный: объединяют преимущества физического и статистического подходов и могут включать измерительные инструменты полевого наблюдения.

Краткосрочное прогнозирование выработки электроэнергии ВЭС

- Обеспечение резервов мощности для работы ВЭС и СЭС возлагается на традиционные электростанции
- Отсутствие достоверных прогнозов = исключение мощности ВЭС и СЭС при формировании диспетчерского графика на сутки вперед
- Формирование избыточных резервов мощности и, как следствие, к неоправданные экономическим издержки
- Краткосрочное прогнозирование - прогнозирование на сутки вперёд (от 6 до 24 часов). Ключевой инструмент для начального распределения ресурсов ВИЭ и ценообразования на рынке электроэнергии и мощности на сутки вперёд.
- Большинство моделей краткосрочного прогнозирования используют физические модели. Обычное временное разрешение прогнозов - 1 час.

Краткосрочное прогнозирование выработки электроэнергии ВЭС

- Испанский системный оператор REE использует систему прогнозирования мощности ВЭС с комбинированной физико-статистической моделью Sipleólico
- Применяется для составления баланса мощности на сутки вперёд и при определении резервов мощности
- Система формирует почасовые прогнозы суммарной выработки ВЭС на горизонты до 10 дней вперед
- Совершенствование модели позволило сократить среднюю ошибку суточного прогноза ветра почти вдвое – с ~18 % до ~9 % за период 2008-2015 гг.

Страна	Дания		Германия		Китай	
Вид прогноза	Треб., %	Факт, %	Треб., %	Факт, %	Треб., %	Факт, %
Краткосрочный	12	3,7-12,13	5	5,5-6	20	12,26

Оперативное прогнозирование выработки электроэнергии ВЭС



- Оперативный прогноз - прогнозирование до 6 часов вперед
- Используется для корректировки краткосрочных прогнозов и диспетчерских графиков загрузки традиционных электростанций в течение операционных суток на основе обновленных данных
- Как правило строятся на основе статистических методов. Обычное временное разрешение прогнозов - 15 минут.

Средства инструментального измерения:

- Для оценки и прогнозирования ветра - лидары, радары и содары
- Для оценки и прогнозирования поступления солнечной радиации - наземные камеры наблюдения неба, пиранометры, облакомеры и спутниковые снимки высокого разрешения

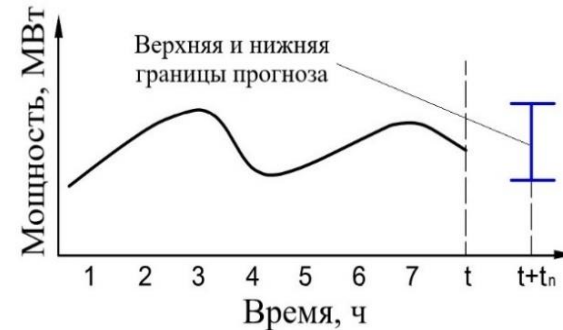
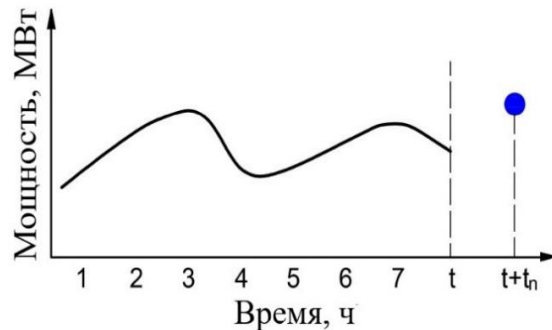
Оперативное прогнозирование выработки электроэнергии ВЭС

- Системные операторы Германии применяют систему оперативного прогнозирования мощности СЭС, основанную на совмещении данных о фактической выдаваемой мощности с репрезентативных СЭС и спутниковых наблюдений облачности
- Для уточнения результатов используются численные метеорологические модели
- Прогнозы и позволяют заблаговременно компенсировать изменения выдаваемой мощности СЭС

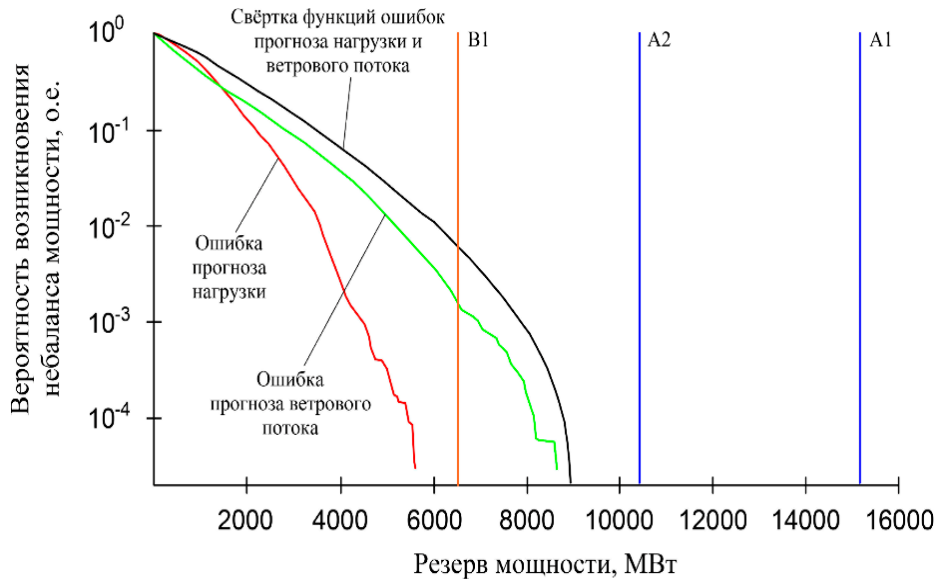
Несмотря на увеличение установленной мощности СЭС в Германии на 110 % в период 2011-2017 гг., удалось снизить совокупный объём резервов мощности вторичного и третичного регулирования примерно на 20 % – с 8,8 до 7,2 ГВт

Вероятностные прогнозы и динамический расчёт резервов мощности

- Детерминированные прогнозы мощности ВЭС и СЭС формируют единственное ожидаемое значение для каждого горизонта прогнозирования
- Не учитывается вероятностная природа метеорологических процессов
- Ограничена возможность системных операторов при оптимизации соотношения между затратами на содержание резервов и риском возникновения небаланса мощности
- Вероятностные прогнозы представляют результаты в виде распределений вероятностей, квантилей или доверительных интервалов, что позволяет количественно оценивать диапазон возможных отклонений фактической мощности от прогнозной



Вероятностные прогнозы и динамический расчёт резервов мощности



- Метод основан на совмещении распределений плотности вероятностей ошибок прогнозирования мощности ВЭС и нагрузки с использованием рекуррентной свёртки
- Для энергосистемы Нидерландов значения необходимого резерва мощности при арифметическом (A1) и геометрическом (A2) суммировании детерминированных методов значительно выше, чем при вероятностном подходе (B2)

Выводы

- Прогнозирование мощности ВЭС и СЭС является необходимым условием обеспечения надёжной работы энергосистем, в структуре которых увеличивается доля ВИЭ
- Применение физических, статистических и гибридных моделей позволяет существенно повысить точность прогнозов как на краткосрочном, так и на оперативном горизонтах
- Особое значение для прогнозирования имеют инструменты полевого измерения
- Современной тенденцией становится переход от детерминированных прогнозов к вероятностным, что даёт системным операторам возможность учитывать неопределённость мощности и оптимизировать объёмы резервов мощности

Благодарю за внимание!