

Адаптивная система краткосрочного и оперативного прогнозирования выработки электроэнергии фотоэлектрическими станциями

Ассистент каф. «АЭС»
УралЭНИН УрФУ
С. А. Ерошенко

Актуальность темы

Прогнозирование
объема
выработки ФЭС

1

Снижение расходов в солнечной энергетике за счет перспективных инноваций и государственная политика поддержки ВИЭ

2

Рост объёмов распределённой генерации на базе ВИЭ и интеграция их в ЕЭС России

3

ФЭС – полноценный участник рынка электроэнергии и мощности (в рамках ДПМ ВИЭ)

4

Низкая точность прогнозирования выработки ФЭС существующими инструментами

5

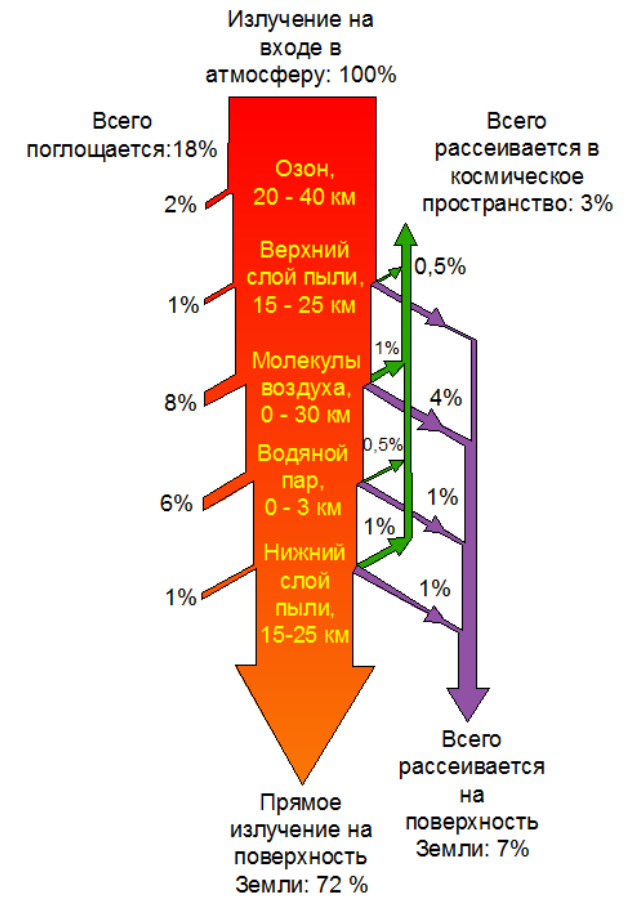
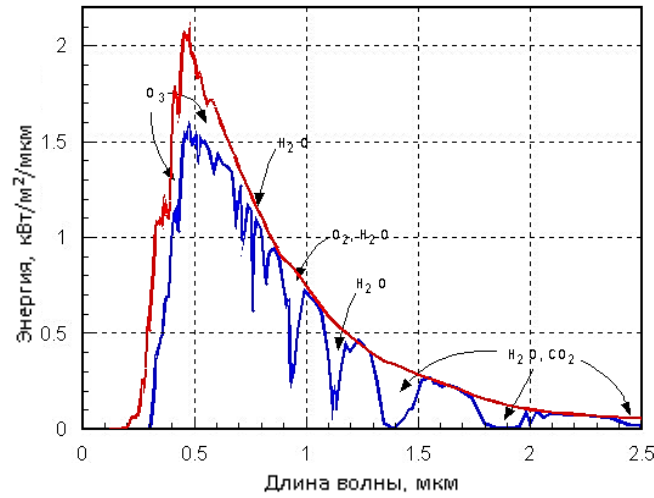
Проблема низкого качества данных (взаимной согласованности, достоверности, полноты и объема) и необходимости их обработки

Актуальность темы

Прогноз	Целевая категория	Область применения
Краткосрочный прогноз (6-48 часов)	Сетевые компании, диспетчерские центры, системный оператор	Для диспетчеризации энергоблоков, расчетов распределения потоков мощности, расчета сетевых перегрузок на сутки вперед
	Трейдеры	Для торговли на рынке на сутки вперед, участия в рынке системных услуг и воздействию на рыночную цену
	Операторы ФЭС	Для планирования технического обслуживания оборудования на сутки вперед
Оперативный прогноз (0-6 часов)	Сетевые компании, диспетчерские центры, системный оператор	Для балансирования, диспетчеризации и снижению выработки
	Трейдеры	Для торговли на внутрисуточном рынке, активации регулирующих мощностей (вторичного и третичного резерва) и возможному воздействию на рыночную цену

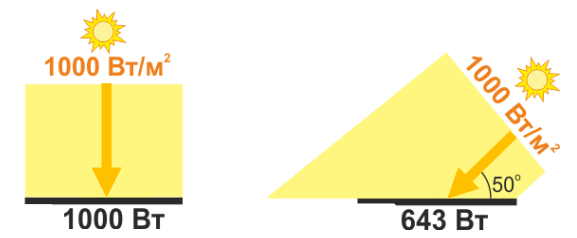
№	Существующие системы	Преимущества	Недостатки
1	Sandia Photovoltaic Array Performance Model	Многопараметрическая оценка выработки фотоэлектрических панелей (ФЭП)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Использование среднесрочных и долгосрочных климатических данных из открытых научных источников ▪ Большая погрешность краткосрочного прогнозирования (50%) выработки ФЭС ▪ Необходимость значительной обработки и фильтрации используемых метеорологических данных ▪ Высокая стоимость метеорологических данных со спутников при погрешности прогнозирования около 30% ▪ Использование зарубежных стандартов и необходимость значительной переработки для использования в РФ
2	5-Parameter Array Performance Model (System Advisor Model)	Пяти-параметрическая модель для оценки максимальной мощности и ВАХ ФЭП	
3	The Integrated Simulation Environment Language (INSEL)	Библиотека для моделирования внешних эксплуатационных условий ФЭП	
4	Solar Estimate	Оценка выработки и расчет солнечного излучения с упрощенным учетом КПД ФЭП	

Особенности прогнозирования ФЭС



Основные этапы расчета

- Определение параметров солнечного излучения на границе атмосферы Земли
- Определение солнечного излучения на горизонтальной плоскости у поверхности Земли
- Определение солнечного излучения на наклонной плоскости у поверхности Земли



Краткосрочное прогнозирование

Исходные данные

Входные данные по солнечному излучению

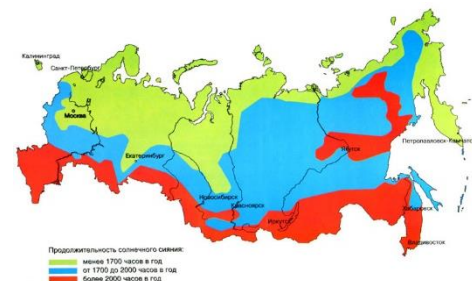
1. Географические координаты
Широта φ и долгота λ , [град]
2. Метеоданные
Облачность TCC_1 и TCC_2 , [о.е.]
Относительная влажность RH_1 и RH_2 , [о.е.]
Температура T_{a1} и T_{a2} , [$^{\circ}$ C]
Альbedo r_g , [о.е.]
3. Регрессионные коэффициенты
Для определения коэффициента прозрачности a_1, b_1, c_1, d_1
Для определения коэффициента рассеивания a_2, b_2, c_2, d_2
4. Положение панели
Угол наклона панели β , [град]
Азимут панели γ , [град]



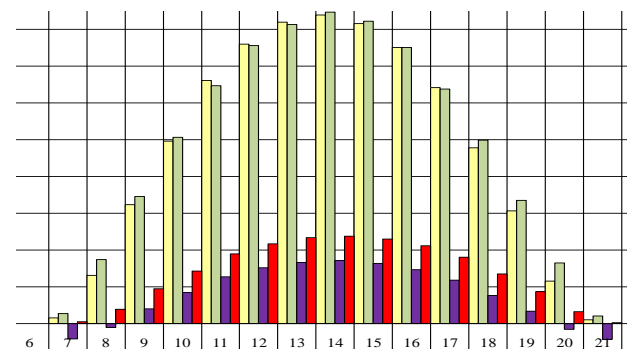
Входные данные по солнечным панелям



Входные данные по инверторам



Дискретность данных - 1 час

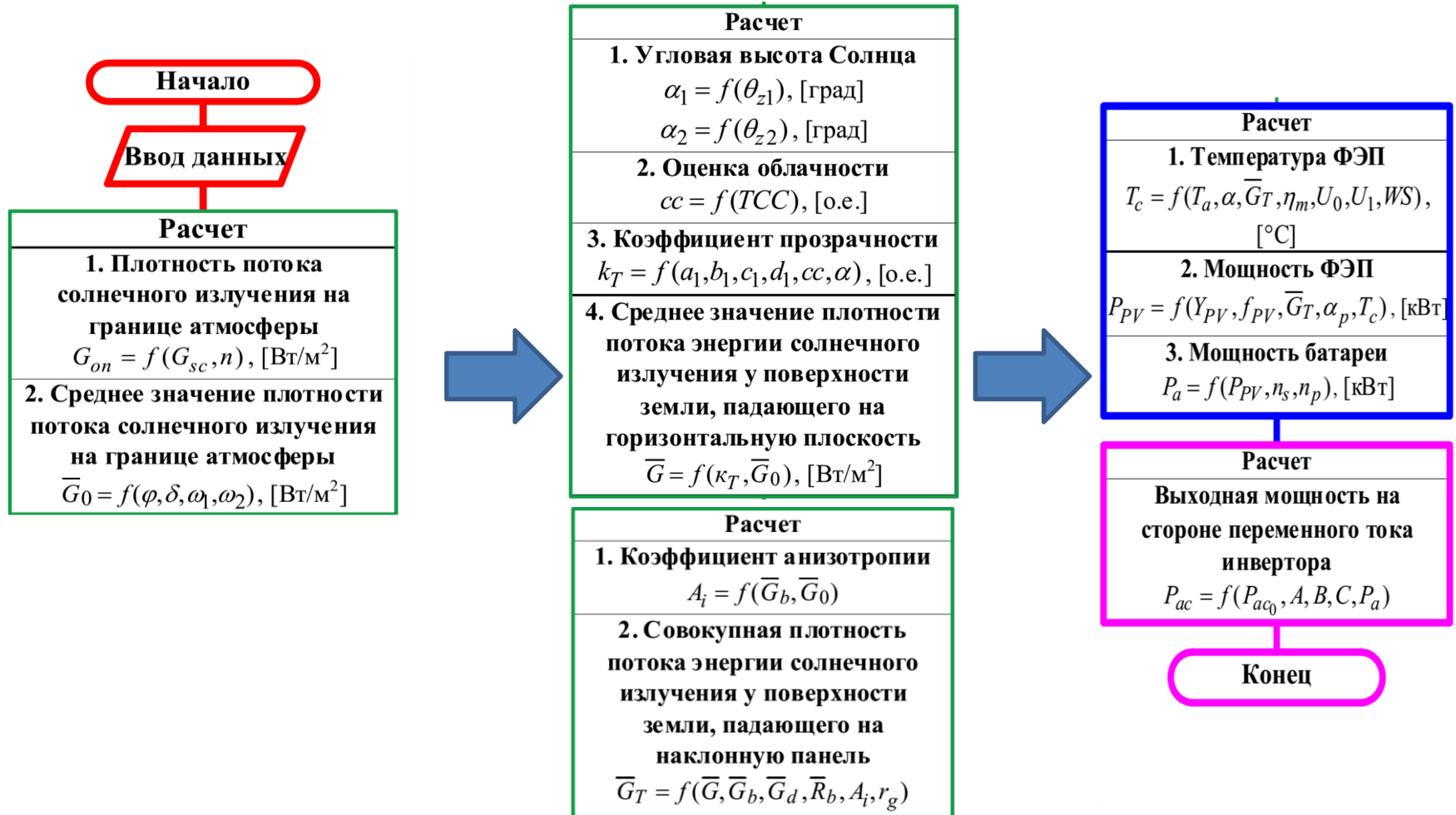


Прогноз выработки СЭС

Дискретность данных - 1 час

Краткосрочное прогнозирование

Блок-схема алгоритма



Апробация алгоритма прогноз «на сутки вперед»

20.09.2017
08:00 } Солнечный день
18:00 }
Погодные условия



Ясно

Метеорологические события

Нет

Прогноз выработки за сутки

86 204 кВтч

Факт выработки за сутки

80 024 кВтч

07.10.2017
08:30 } Солнечный день
18:00 }
Погодные условия



Переменная
облачность

Метеорологические события

Нет

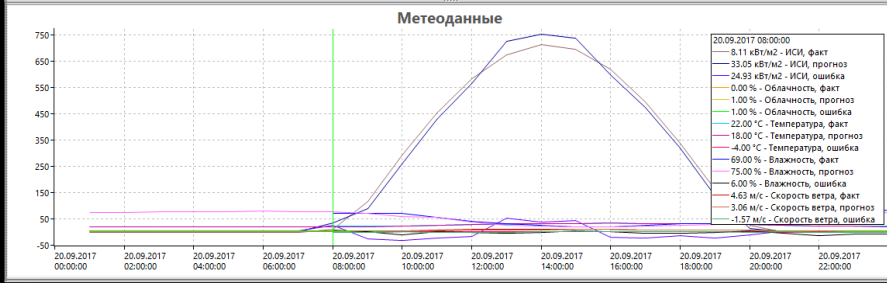
Прогноз выработки за сутки

72 648 кВтч

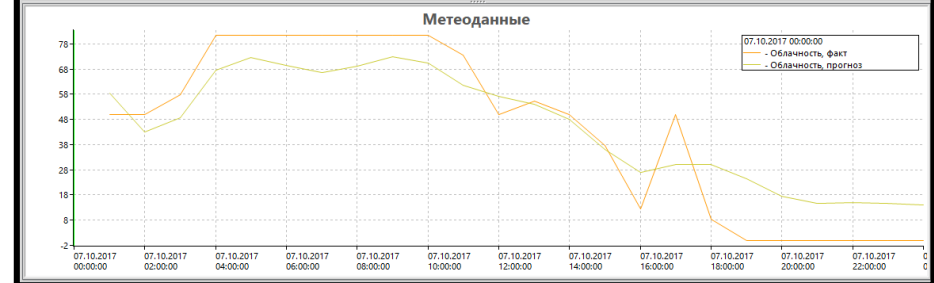
Факт выработки за сутки

72 096 кВтч

Основные [1 час] UTC+5	Генерация, факт, кВтч	Генерация, прогноз, кВтч	Генерация, ошибка, кВтч	Генерация, ошибка, %	ИСИ, факт, кВт/м2	ИСИ, прогноз, кВт/м2	ИСИ, ошибка, кВт/м2	Облачность, факт, %
20.09.2017 05:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.23	0.00	3.23	0.00
20.09.2017 06:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40	0.00	3.40	0.00
20.09.2017 07:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.20	0.00	3.20	0.00
20.09.2017 08:00:00	71.12	405.83	334.71	81.11	33.05	24.93	0.00	0.00
20.09.2017 09:00:00	1 487.64	1 396.58	91.06	-6.12	116.00	88.11	-27.89	0.00
20.09.2017 10:00:00	4 466.23	4 450.87	-15.36	-0.35	290.56	259.05	-31.51	0.00
20.09.2017 11:00:00	7 250.04	7 446.51	196.47	2.71	452.06	427.81	-24.25	0.00
20.09.2017 12:00:00	9 273.60	9 805.03	531.43	5.73	582.90	564.24	-18.66	0.00
20.09.2017 13:00:00	10 571.40	11 881.86	1 310.46	12.40	675.49	727.36	51.87	0.00
Сумма	80 024.28	86 204.05	6 179.77	7.72	-	-	-	-
Среднее	3 334.34	3 591.84	257.49	23.53	214.21	214.01	-0.20	0.00



Основные [1 час] UTC+5	Генерация, факт, кВтч	Генерация, прогноз, кВтч	Генерация, ошибка, кВтч	Генерация, ошибка, %	Облачность, факт, %	Облачность, прогноз, %
07.10.2017 01:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	58.50
07.10.2017 02:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	43.00
07.10.2017 03:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.81	48.50
07.10.2017 04:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.25	67.50
07.10.2017 05:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.25	72.50
07.10.2017 06:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.25	69.50
07.10.2017 07:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.25	66.50
07.10.2017 08:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.25	69.00
07.10.2017 09:00:00	836.64	557.75	-278.89	-33.33	81.25	73.00
07.10.2017 10:00:00	2 492.28	2 766.03	273.75	10.98	81.25	70.50
Сумма	72 096.36	72 648.98	552.62	0.77	-	-
Среднее	3 004.01	3 027.04	23.03	-5.10	44.31	45.08



Апробация алгоритма: переменная облачность

прогноз «на сутки вперед»

16.10.2017

09:00
17:30

Солнечный день

Погодные условия



Облачность

Метеорологические события

Нет

Прогноз выработки за сутки

34 297 кВтч

Факт выработки за сутки

33 491 кВтч

17.10.2017

09:00
17:30

Солнечный день

Погодные условия



Облачность

Метеорологические события

Дождь, туман, дымка

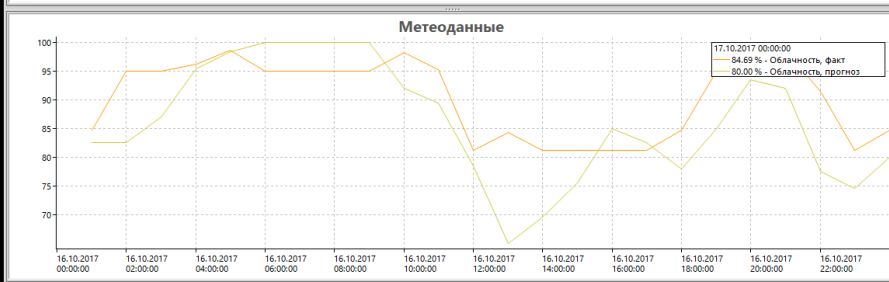
Прогноз выработки за сутки

17 383 кВтч

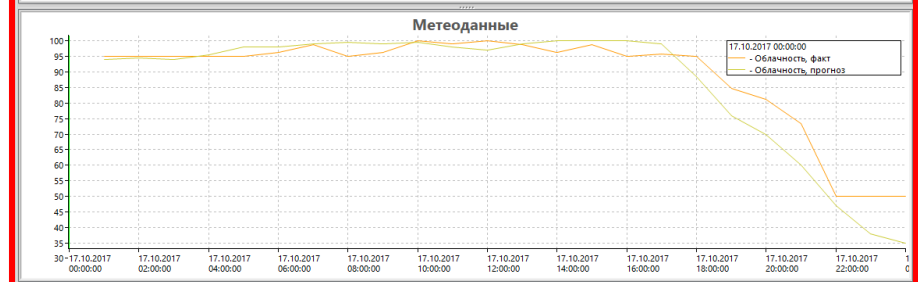
Факт выработки за сутки

6 972 кВтч

Основные [1 час] UTC+5	Генерация, факт, кВтч	Генерация, прогноз, кВтч	Генерация, ошибка, кВтч	Генерация, ошибка, %	Облачность, факт, %	Облачность, прогноз, %
16.10.2017 16:00:00	4 094.16	3 320.90	- 773.26	-18.89	81.25	85.00
16.10.2017 17:00:00	1 528.80	2 331.08	802.28	52.48	81.25	82.50
16.10.2017 18:00:00	357.84	1 780.73	1 422.89	397.63	84.69	78.00
16.10.2017 19:00:00	57.12	150.65	93.53	163.74	95.00	85.00
16.10.2017 20:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	96.25	93.50
16.10.2017 21:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.75	92.00
16.10.2017 22:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	91.56	77.50
16.10.2017 23:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.25	74.50
17.10.2017 00:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.69	80.00
Сумма	34 297.20	33 491.73	- 805.47	-2.35	-	-
Среднее	1 429.05	1 395.49	-33.56	56.66	90.26	86.00



Основные [1 час] UTC+5	Генерация, факт, кВтч	Генерация, прогноз, кВтч	Генерация, ошибка, кВтч	Генерация, ошибка, %	Облачность, факт, %	Облачность, прогноз, %
17.10.2017 01:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00	94.00
17.10.2017 02:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00	94.50
17.10.2017 03:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00	94.00
17.10.2017 04:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00	95.50
17.10.2017 05:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00	98.00
17.10.2017 06:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	96.25	98.00
17.10.2017 07:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.75	99.00
17.10.2017 08:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00	99.50
17.10.2017 09:00:00	42.00	119.96	77.96	185.62	96.25	99.00
17.10.2017 10:00:00	283.08	635.31	352.23	124.43	100.00	99.50
Сумма	6 972.00	17 383.90	10 411.90	149.34	-	-
Среднее	290.50	724.33	433.83	81.34	88.72	86.60



Анализ «узких мест»: формирование выборки прогноз «на сутки вперед»

Дата	Средняя облачность, о.е.	Ретроспектива			Ошибка MAPE, %
		Диапазон углов	Объем выборки, шт.	Принцип формирования	
21.10.17	0,933	0,0 - 20,0	503	исходная выборка значений	15,207
	0,753	20,0 - 40,0	295		
20.10.17	0,713	0,0 - 20,0	503	исходная выборка значений	16,802
	0,740	20,0 - 40,0	295		
19.10.17	0,188	0,0 - 20,0	503	исходная выборка значений	15,642
	0,036	20,0 - 40,0	295		
18.10.17	0,378	0,0 - 20,0	503	исходная выборка значений	20,777
	0,474	20,0 - 40,0	295		
17.10.17	0,940	0,0 - 20,0	503	исходная выборка значений	13,352
	0,977	20,0 - 40,0	295		
18.10.17	0,378	0,0 - 20,0	194	фильтр: "Разорванная облачность", высота облаков более 500 м	11,138
	0,474	20,0 - 40,0	43		
17.10.17	0,940	0,0 - 20,0	110	фильтр: "Осадки", "Туман", "Дымка"	9,314
	0,977	20,0 - 40,0	74		

Скорректированный прогноз выработки за сутки **10 298 кВтч**

Факт выработки за сутки **6 972 кВтч**

Оперативное прогнозирование

Постановка задачи

- необходимость учета **текущих измерений**

- необходимость учета **колебаний** метеопрогноза

Обучающая выборка

$$S = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{1a} & y_1 \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{2a} & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{l1} & x_{l2} & \dots & x_{la} & y_l \end{bmatrix}$$

y_i - параметр, измеренное значение ППСИ

x_{ij} - признак, соответствующий параметру:

- ▶ Угол солнечного склонения
- ▶ ППСИ на границе атмосферы
- ▶ Коэффициент прозрачности (ретроспектива)
- ... другие признаки

l - число наблюдений

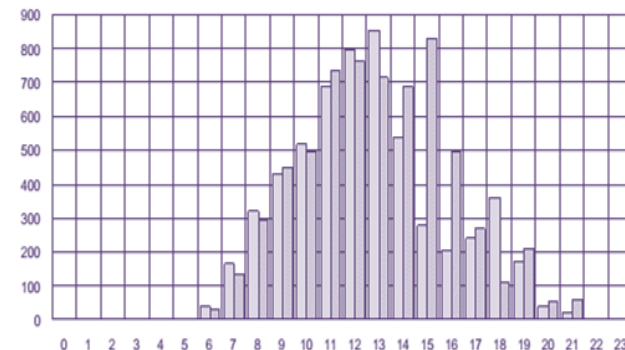
a - число признаков

$$\begin{matrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{1a} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{2a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{l1} & x_{l2} & \dots & x_{la} \end{matrix}$$

Модель

$$f(x_{ij})$$

$$\begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_l \end{matrix}$$

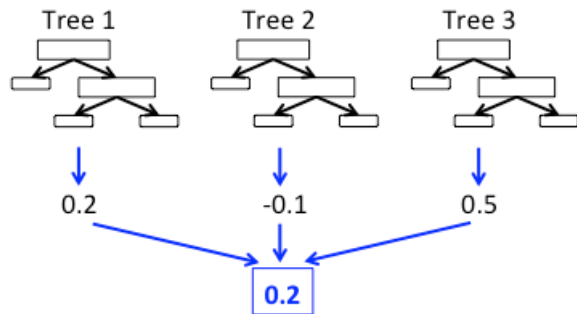


Оперативное прогнозирование

Описание алгоритма

Бустинг – композиция большого числа неглубоких деревьев

- базовые решающие деревья строятся один за другим
- каждое последующее исправляет ошибки построенной композиции



Решение задач прогнозирования



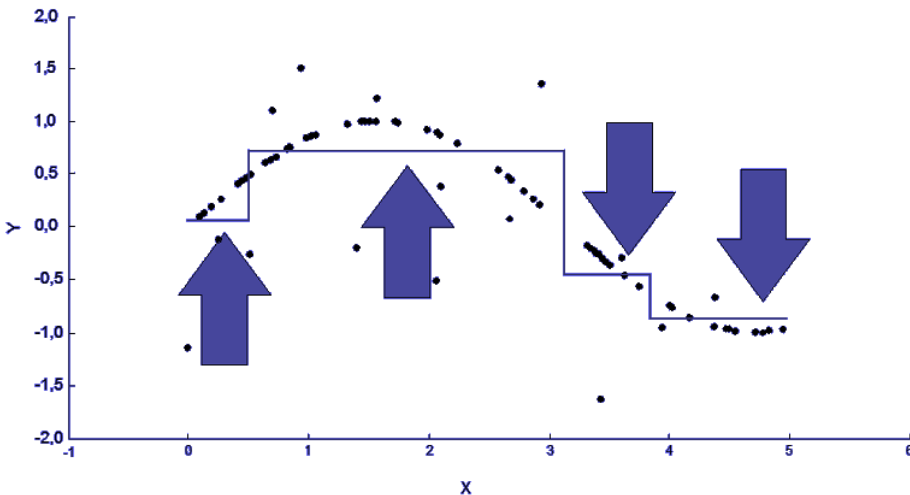
минимизация MSE

$$MSE(a, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_i - a(x_i))^2$$



N базовое дерево настраивается
на ошибку $N-1$ дерева

$$b_N(x) = \arg \min_b \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(b(x_i) - \left(y_i - \sum_{n=1}^{N-1} b_n(x_i) \right) \right)^2$$



Оперативное прогнозирование

Настройки алгоритма

Таблица 1 – Возможные варианты формирования выборки для оперативного прогноза

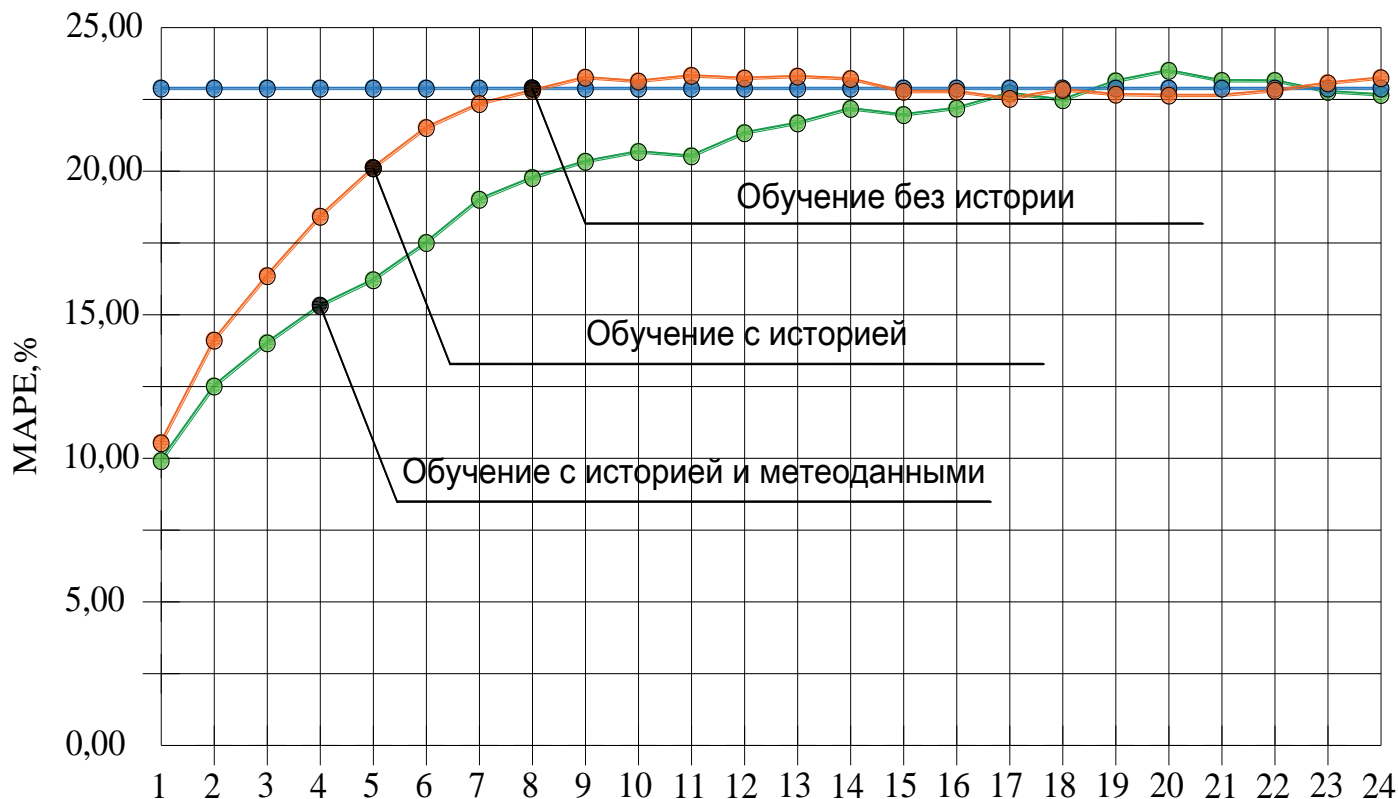
№	Признаки	Типы входных данных		
		Обучение без истории	Обучение с историей	Обучение с историей и метеоданными
1	Номер дня в году	+	+	+
2	Угол солнечного склонения	+	+	+
3	Солнечное время	+	+	+
4	Измеренный коэф. прозрачности,		+	+
5	ППСИ на границе атмосферы		+	+
6	Средняя влажность за час, %			+
7	Среднее значение облачности за час,%			+

Таблица 2 – Настройка градиентного бустинга над решающими деревьями

№	Параметры настройки	Типы входных данных		
		Обучение без истории	Обучение с историей	Обучение с историей и метеоданными
1	Длина шага	0,005	0,01	0,01
2	Глубина деревьев	4	4	6
3	Количество деревьев	3000	3000	3000
4	Количество итераций	3000	3000	3000
5	Доля переменных, используемых на каждой итерации	0,8	0,8	0,8
6	Доля переменных, используемых на каждом уровне дерева	0,7	0,7	0,7

Апробация алгоритма

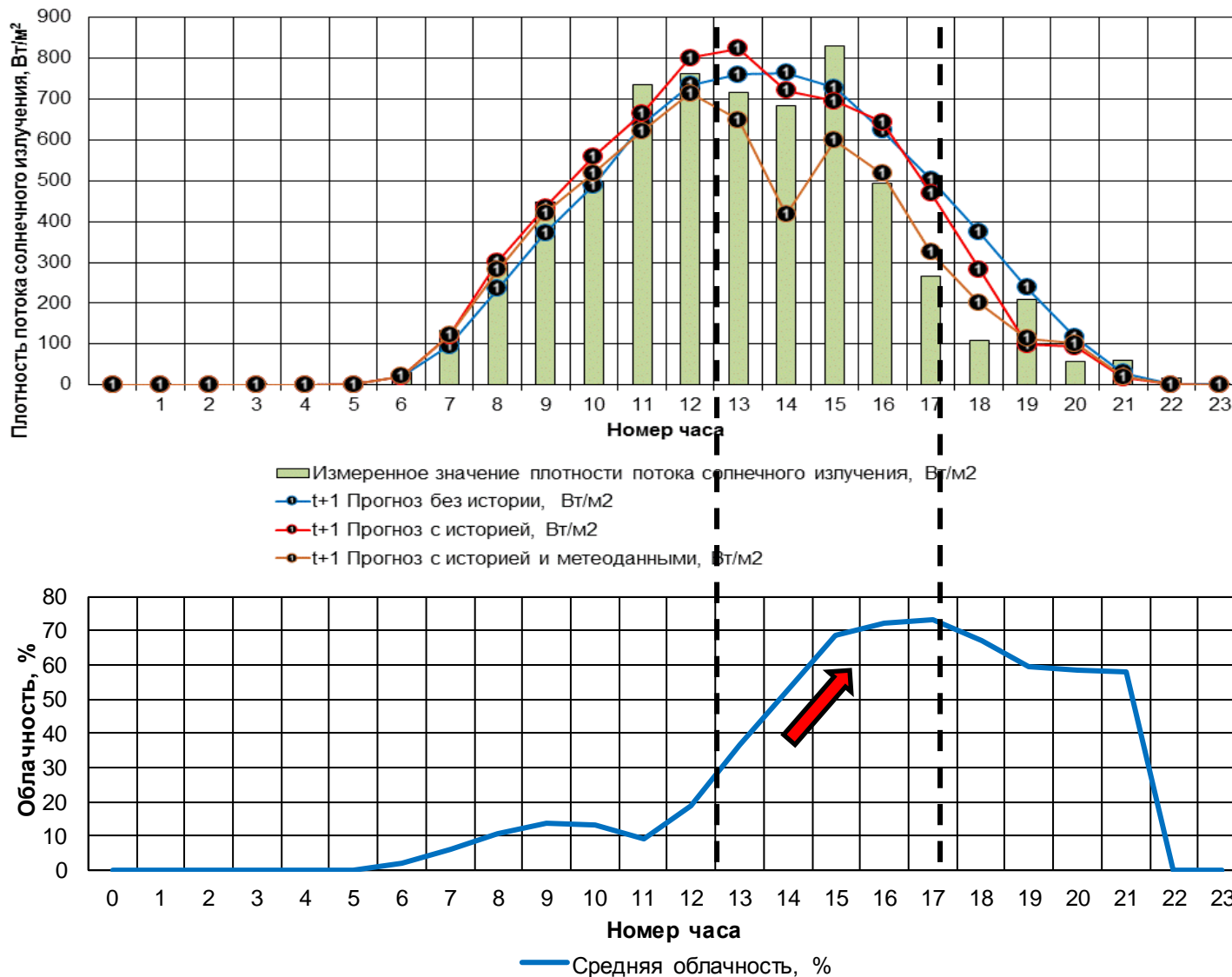
Оперативный прогноз «на час вперед»



Период	Структура входных данных		
	Без истории	С историей	С историей и метеоданными
	MAPE, %	MAPE, %	MAPE, %
25.11.15 – 21.10.17	23,561	12,362	11,263

Анализ «узких мест»: достоверность метеоданных

Оперативный прогноз «на час вперед»



Заключение

- **Не существует готового программно-технического решения для прогнозирования выработки СЭС российского производства, адаптированного под нац. специфику**
- **Система краткосрочного (КСП) и оперативного прогнозирования (ОП) выработки СЭС должна отвечать требованиям высокой точности прогноза (для ВИЭ), универсальности при внедрении на новом объекте, минимизации состава агрегированной исходной информации для обработки**
- **Разработанная система краткосрочного и оперативного прогнозирования выработки СЭС обеспечивает среднюю ошибку КСП до 25% и ОП – до 10% с учетом погрешности метеоданных, что находится на уровне мировых показателей**
- **Ключевым фактором, влияющим на величину ошибки прогнозирования выработки СЭС является качество предоставляемой метеопровайдером информации, в отношении которой могут быть сформированы следующие рекомендации:**
 - с метеопровайдером рекомендуется заключать Договор об обслуживании с указанием конкретных требований к качеству предоставляемой информации и процедур контроля соответствия информации заявленным характеристикам.
 - рекомендуется согласовывать и утверждать состав исходных метеорологических данных согласно перечню влияющих факторов, а также указать дискретность, режим доступа к данным (периодичность, количество обращений за сутки и др.).
 - рассмотреть возможность использования нескольких дублирующих прогнозов от разных метеопровайдеров и целесообразность установки дополнительных устройств мониторинга метеоусловий в районе размещения объекта СЭС.

Спасибо за внимание

Ерошенко Станислав Андреевич,
ассистент каф. АЭС УралЭНИН УрФУ
stas_ersh@mail.ru
+7-912-033-333-5