

---

# Прогнозирование рыночной конъюнктуры на оптовом рынке электроэнергии

---

**Оценка зависимости изменения розничных цен на  
электроэнергию от динамики экзогенных факторов  
(экономических и правовых характеристик)**

---

*Золотова Ирина Юрьевна*

*Институт проблем ценообразования и  
регулирувания естественных монополий  
НИУ ВШЭ*

Москва  
2018

# Содержание

1. Краткая характеристика рынка электроэнергии в России. Специфика «рынка на сутки вперед» (РСВ) и «балансирующего рынка» (БР).
2. Определение задачи и объекта (предмета) исследования (анализа).
3. Модели прогнозирования. Прогнозирование на основе нейронных сетей (теоретические основы).
4. Этапы прогнозирования в рамках настоящего исследования:
  - Определение оптимального набора факторов
  - Определение конфигурации сети
  - Прогнозирование и оценка результатов (точности).

# Рынок электроэнергии в России

## 1. Генерация (оптовый рынок)

### Мощность

- Регулируемые цены (тарифы)
- Свободное ценообразование (КОМ)
- Цена на новую мощность (ДПМ)

### Электроэнергия

- Регулируемые цены (тарифы)
- Свободное ценообразование (РСВ и БР)

2. Электросетевой комплекс (передача электроэнергии - ФСК и распределение – ТСО)

3. Сбыт электроэнергии (гарантирующие поставщики и независимые сбытовые компании)

4. Инфраструктурные организации

«Рынок на сутки вперед» (РСВ) – аукцион закрытого типа, **маржинальный** принцип ценообразования (отбор заявок поставщиков – «от минимальной по цене»), узловое ценообразование

«Балансирующий рынок» (БР) – покупка-продажа отклонений

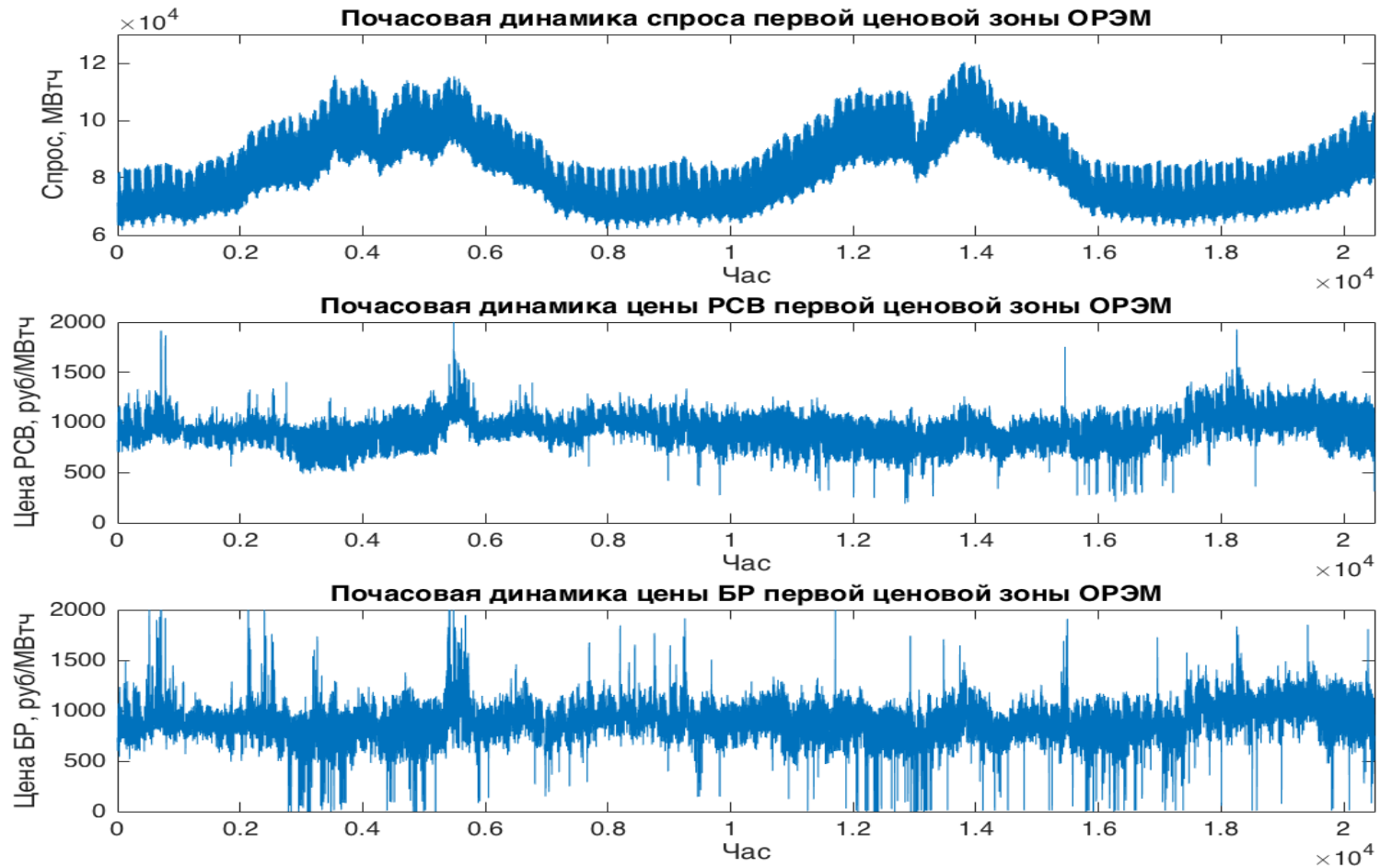
# Задачи исследования и анализируемые параметры

1) Сформировать **модели для прогноза** почасовой динамики на следующие сутки, а также неделю и месяц вперед следующих показателей:

- **объем спроса на электрическую энергию**
- **цена на электроэнергию на РСВ**
- **цена на электроэнергию на БР**

2) Определить оптимальный с точки зрения точности прогнозирования **набор** экзогенных переменных (**факторов**) для прогнозных моделей рассматриваемых показателей

# Анализируемая динамика рассматриваемых показателей



Исторические данные (выборка) - с 8 июля 2010 года по 30 сентября 2012 года  
Прогнозный период - ноябрь 2012 года

# Модели прогнозирования

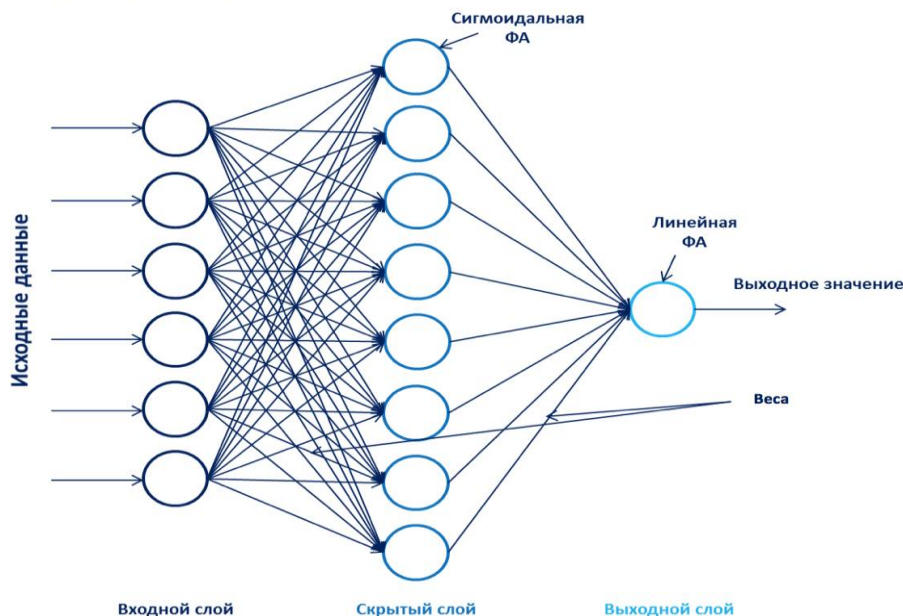
- Модели на основе теории игр, модели равновесия (Курно, Бертран, Нейман, Нэш)
- Имитационные и фундаментальные модели
- Модели, основанные на анализе временных рядов:
  - Традиционные статистические (параметрические регрессионные модели, авторегрессии, скользящего среднего и др.)
  - Модели искусственного интеллекта (на основе нейронных сетей **Artificial neural network**)

Важным аспектом является подбор факторов, которые

- А) Максимально точно описывают анализируемый показатель
- Б) Строго детерминированы (прогнозируемы) на перспективу

# Прогнозирование на основе нейронных сетей (ANN)

Структура нейронной сети



## Этапы моделирования:

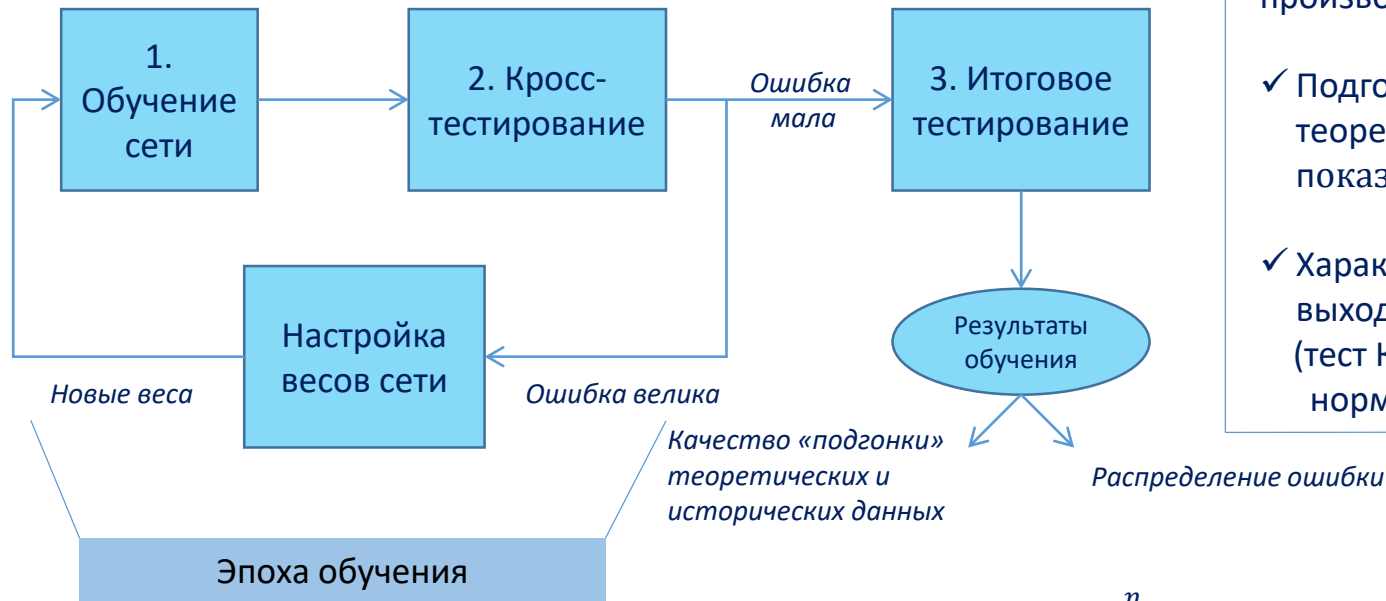
- Определение оптимального набора факторов (регрессоров), максимально точно описывающих историческую динамику рассматриваемых показателей
- Формирование (оптимизация) конфигурации модели (сети) по каждому показателю
- Почасовое прогнозирование параметров на сутки, неделю и месяц вперед и оценка точности прогноза

Наиболее распространенный вид ANN - Многослойный перцептрон

- Число нейронов во входном слое определяется числом входных параметров (факторов), в выходном слое – числом выходных параметров (рассматриваемых показателей), в скрытом слое – экспериментальным путем по итогам **кросс-валидации**
- Для моделирования на основе ANN необходимо ее обучить – подогнать веса ветвей сети так, чтобы при подаче сигнала на вход сети получить целевое значение выходного сигнала
- Обученная сеть в дальнейшем применяется для прогнозирования показателей

# Обучение нейронной сети и оценка адекватности результатов прогноза

Процесс обучения сети. Этапы



Оценка качества обучения сети производится на основе:

- ✓ Подгонки исторических (целевых) и теоретических (выходных) значений показателя ( $R^2$ )
- ✓ Характера распределения ошибки выходного значения показателя (тест Колмогорова-Смирнова на нормальность распределения)

**Адекватность результатов прогноза оценивается на основе средней абсолютной ошибки и аналогичного показателя в процентах**

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \cdot 100\%$$

$y_t$  – фактические значения

$\hat{y}_t$  – прогнозные значения

$n$  – число наблюдений

Для обучения сети выборку (до прогнозного периода) разбивают на три участка: 70% - для обучения (1), 15% - для кросс-тестирования (2), 15% - для итогового тестирования (3)



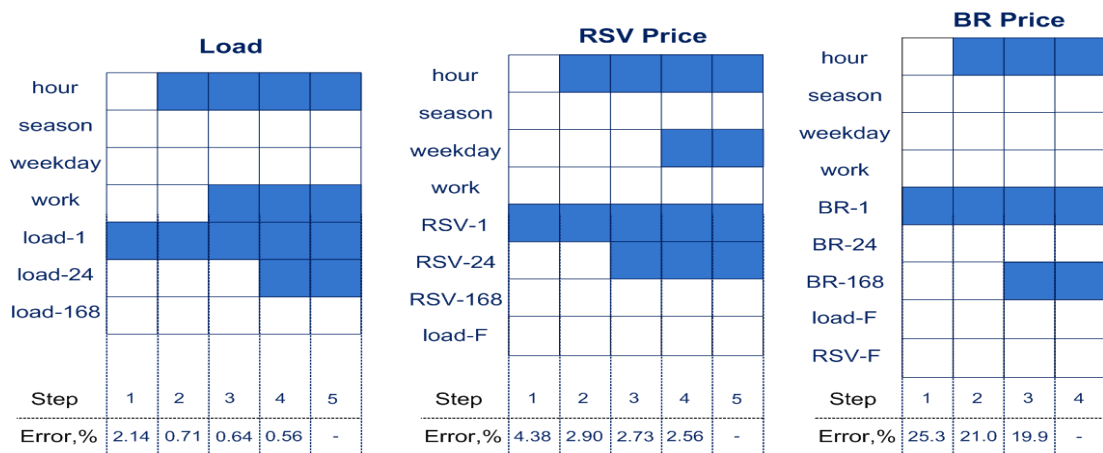
# Определение оптимального набора факторов

1) Для каждого показателя изначально рассмотрено от 7 до 9 факторов:

- Для объема спроса (7 «своих» факторов)
- Для цены РСВ (7 «своих» фактор + фактор «объем спроса», всего 8 факторов)
- Для цены БР (7 «своих» фактор + фактор «объема спроса» + фактор «цена РСВ», всего 9 факторов)

✓ Если включение дополнительного фактора не приводит к увеличению точности моделирования, процедура останавливается.

2) Последовательно включали факторы в модель



Результаты анализа показали, что наилучшая точность моделирования с применением от 3 (для цены БР) до 4 факторов (для объема спроса и цены РСВ)

## Рассмотренные факторы

### «СЕЗОННЫЕ»

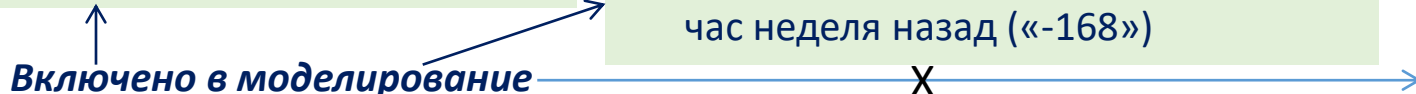
- Час операционных суток
- День недели
- Признак «выходной/праздничный день или рабочий день»

### «ИСТОРИЧЕСКИЕ»

- Значение показателя час назад («-1»)
- Значение показателя в аналогичный час сутки назад («-24»)
- Значение показателя в аналогичный час неделя назад («-168»)

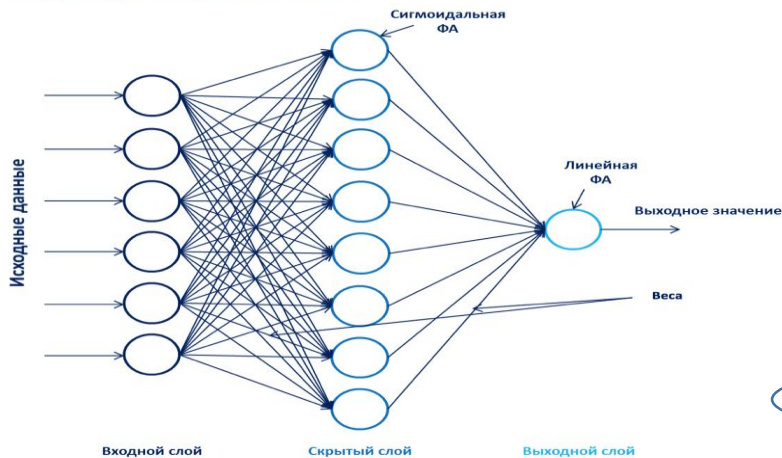
### «ОТРАСЛЕВЫЕ»

- График загрузки ТЭЦ
- Ремонтная компания
- Водность ГЭС
- Стратегия поставщиков



# Оптимизация конфигурации ANN с применением кросс-валидации

Структура нейронной сети

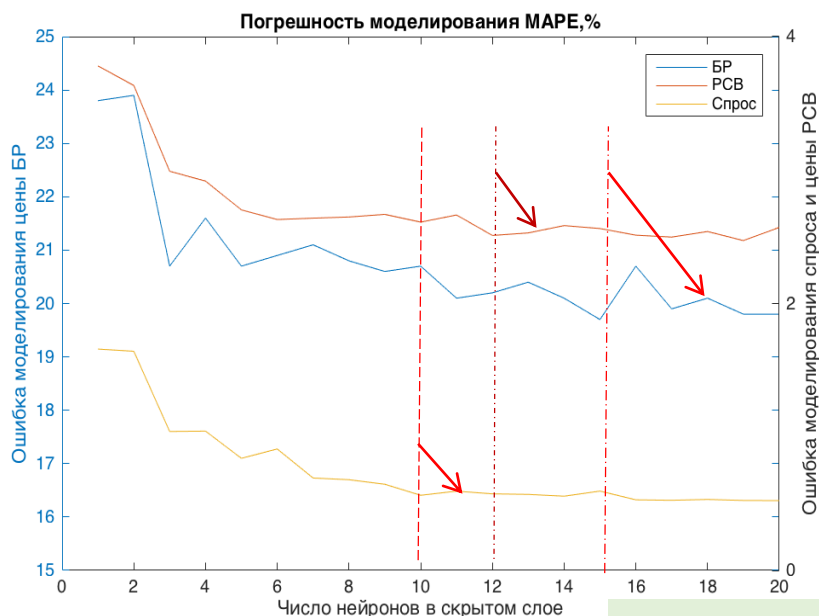


Определено:

- 1) Количество нейронов в входном слое = 3...4 (количество факторов)
- 2) Количество нейронов в выходном слое = 1 (рассматриваемый показатель)

Необходимо найти:

- 3) Количество нейронов в скрытом слое - ?



- Для каждой из нейронной сети была проведена процедура **кросс-валидации**  
*Кросс-валидация заключается в изменении конфигурации сети и оценка последствий изменения конфигурации на точность моделирования*
- Изначально для всех моделей рассмотренное количество нейронов = 20

Определено оптимальное число нейронов в скрытом слое для каждой из нейронной сети: для объема спроса = 10, цены РСВ = 12, цены БР = 15

Сформирована оптимальная конфигурация сети

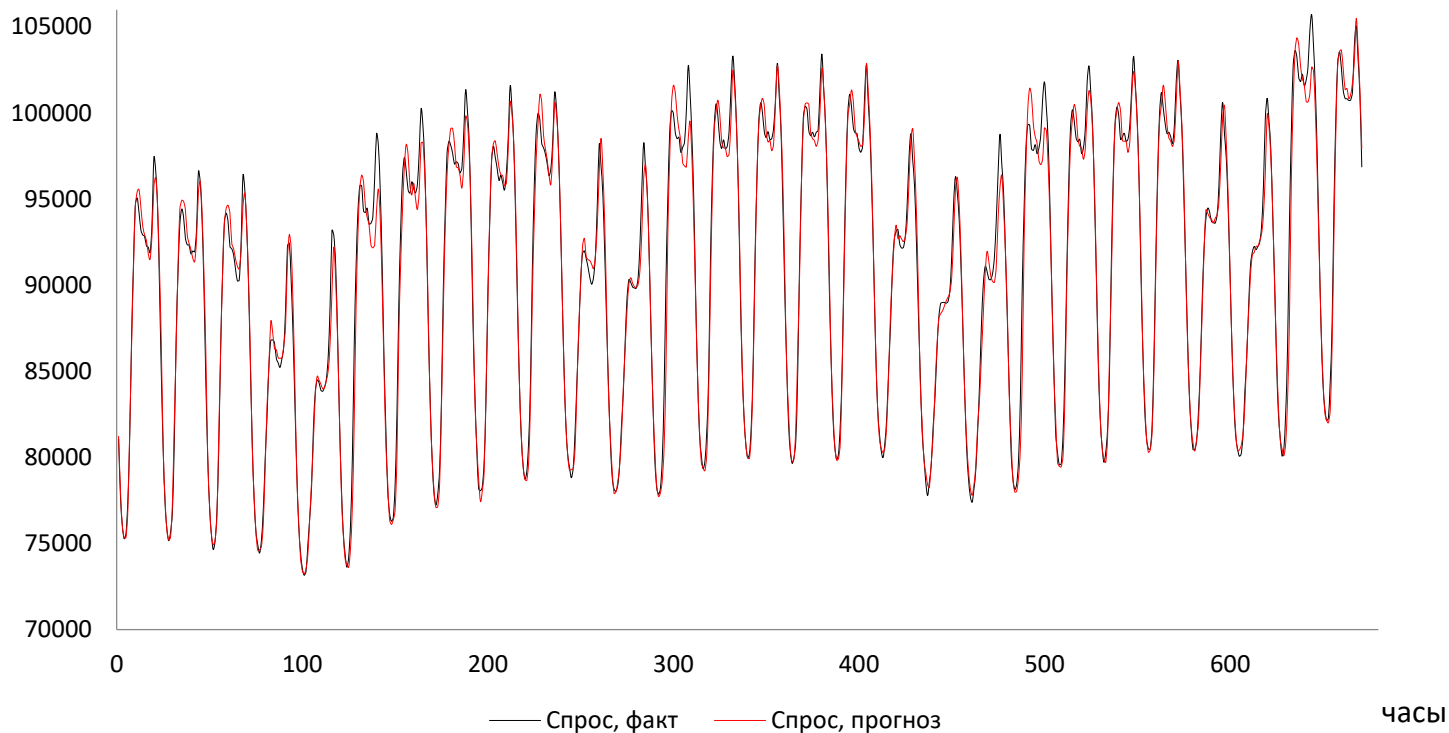
# Этап прогнозирования и оценка результатов

Ноябрь 2012 года

# Результаты прогнозирования спроса

Прогноз спроса электроэнергии в 1 ценовой зоне ОРЭМ,  
МВтч

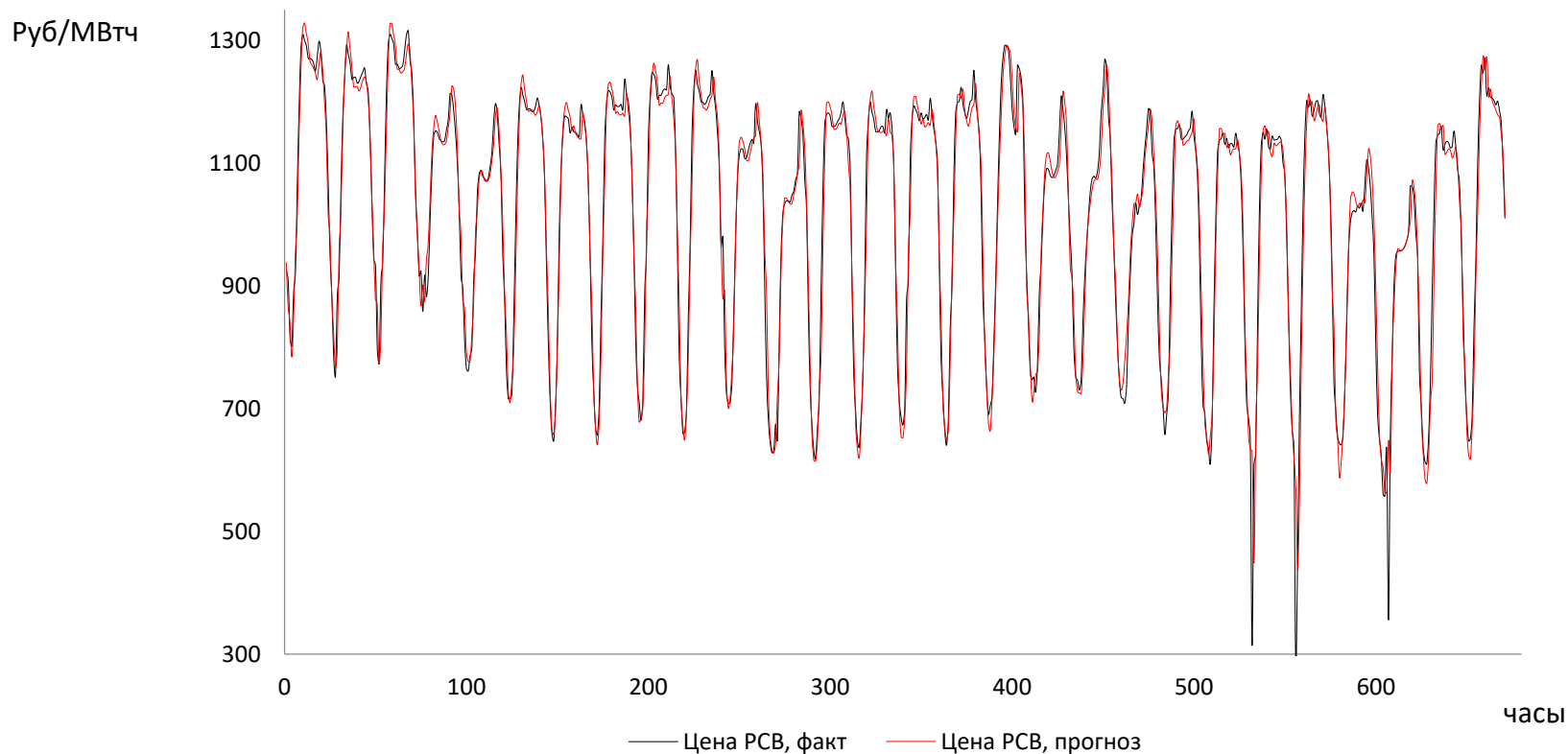
МВтч



Горизонт	MAE, МВтч	MAPE
день	538.4	0.60%
неделя	738.5	0.83%
месяц	718.0	0.78%

# Результаты прогнозирования цены РСВ

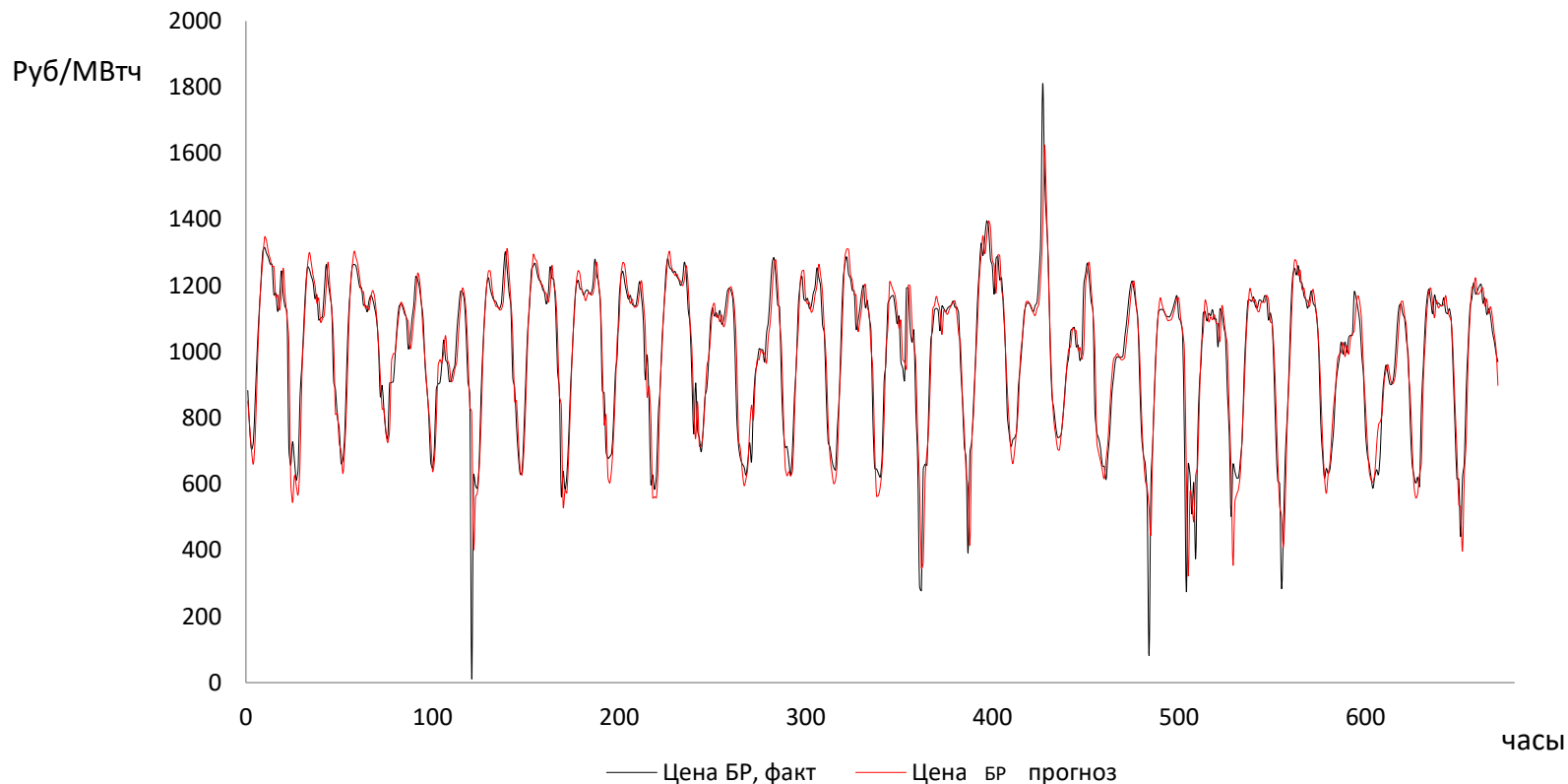
Прогноз цены РСВ в 1 ценовой зоне ОРЭМ, руб/МВтч



Горизонт	MAE, руб/МВтч	MAPE
день	25.46	2.3%
неделя	22.68	2.2%
месяц	25.78	3.0%

# Результаты прогнозирования цены БР

Прогноз цены БР в 1 ценовой зоне ОРЭМ, руб/МВтч



Горизонт	MAE, руб/МВтч	MAPE
день	50.8	5.56%
неделя	45.9	4.40%
месяц	48.1	6.49%

# Оценка результатов прогнозирования цены РСВ

## Точность моделей прогнозирования цен на электроэнергию (РСВ) на основе нейронных сетей (примеры)

Автор	Страна	Горизонт	MAPE, %			
			Зима	Весна	Лето	Осень
Catalao J.P.S. [5]	Испания	неделя	5,23	5,36	11,40	13,65
Anbazhagan S. [2]	Испания	неделя	4,03	4,29	8,29	8,65
Anbazhagan S. [2]	США (Нью-Йорк)	неделя	4,89	3,90	3,05	2,88
Voronin V. [21]	Финляндия	неделя	4,70	5,45	9,43	4,75
Neupane B. [15]	США (Нью-Йорк)	месяц	4,31	4,09	4,72	3,48
Neupane B. [15]	Австралия	месяц	9,09	5,21	6,94	4,57
Ranjbar M. [17]	Канада (Онтарио)	месяц	18,5	-	-	-

## Ошибка прогноза цены РСВ на горизонте прогнозирования один месяц в различные сезоны 2012 года (авторы исследования)

Сезон	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
Ошибка	MAPE	MAPE	MAPE	MAPE
	%	%	%	%
I неделя	3,5%	2,3%	3,1%	2,8%
II неделя	3,6%	2,8%	2,2%	2,9%
III неделя	2,6%	4,0%	2,7%	2,3%
IV неделя	2,4%	4,2%	2,1%	2,9%
<b>Месяц</b>	<b>3,0%</b>	<b>3,4%</b>	<b>2,5%</b>	<b>2,7%</b>
Число «аномалий»	1	4	2	0

# ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- ✓ Наиболее точными являются модели, включающие ограниченный набор исходных экзогенных факторов и «не перегруженные» избыточной информацией
- ✓ Все факторы являются детерминированы на перспективу (исключен риск снижения качества прогноза показателя, возможный ввиду неточности прогнозирования экзогенных параметров)
- ✓ Высокая точность прогнозирования рассматриваемых параметров обеспечивается на основе сезонных (час операционных суток, день недели, «выходной/рабочий» день) и соответствующих исторических данных (значение показателя «t назад»)

- ✓ «Системные» факторы, такие как величина спроса (при прогнозировании цены РСВ) и цена РСВ (при прогнозировании цены БР), в достаточной степени не оказывают положительного результата на аккуратность моделирования.

Данный эффект вызван влиянием на данные факторы такого параметра, как «поведенческая стратегия» игроков рынка (который является в значительно меньшей степени предопределенным по сравнению с рассматриваемыми выше факторами).

- ✓ Низкая ошибка прогнозирования достигается при предсказании параметров функционирования рынка электроэнергии, которые наименее подвержены влиянию «поведенческих стратегий» игроков рынка (такие как, спрос на электроэнергию). Наиболее высокие ошибки прогнозирования показывают ценовые параметры, ввиду наличия влияния на них не только детерминированных факторов.



# Оценка зависимости изменения розничных цен на электроэнергию от динамики экзогенных факторов

$$\hat{y} = -14,281 + 0,612x_1 + 0,188x_2 + 0,324x_3 \text{ (модель 1)}$$

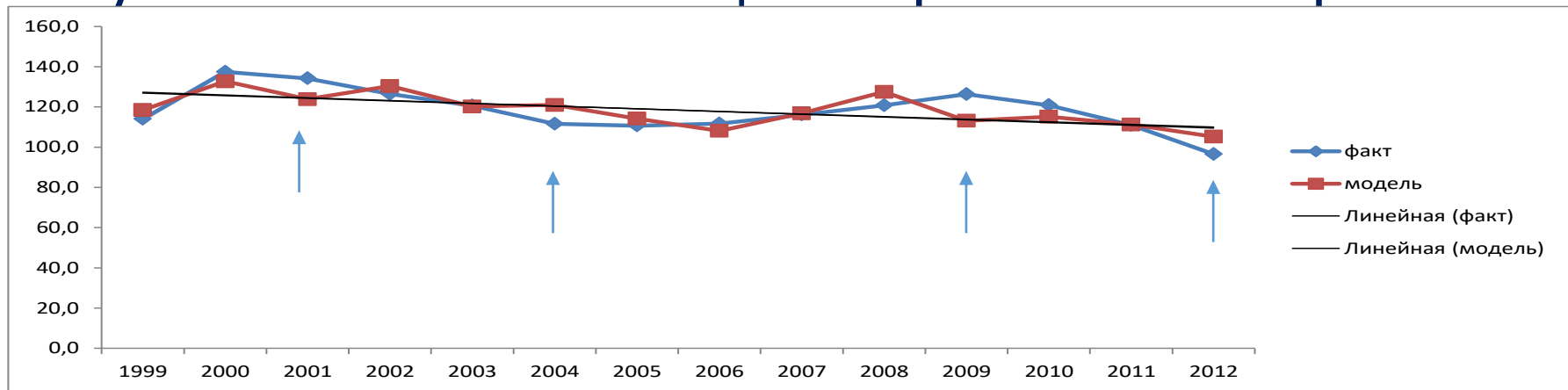
где  $y$  – темп роста розничных цен на электроэнергию,  $x_1$  – темп роста цен на газ,  $x_2$  – темп роста цен на уголь,  $x_3$  – инфляция

$$R^2 = 0,5868$$

- Оценка коэффициентов уравнения при  $x_1$  и  $x_2$  показала их значимость с вероятностью 88% (с вероятностью 93% значимым оказывается только коэффициент при  $x_1$ )
- Коэффициенты свободного члена и при переменной  $x_3$  незначимы при рассматриваемых вероятностях

*Автором ставится задача по нахождению уравнения регрессии более высокого качества ( $R^2$  должен составлять не менее 0,8), и значимость коэффициентов которого будет не ниже «желаемого» (допустимого) уровня (95%)*

# Анализ полученных результатов: интерпретация с учетом особенностей ценообразования в отрасли



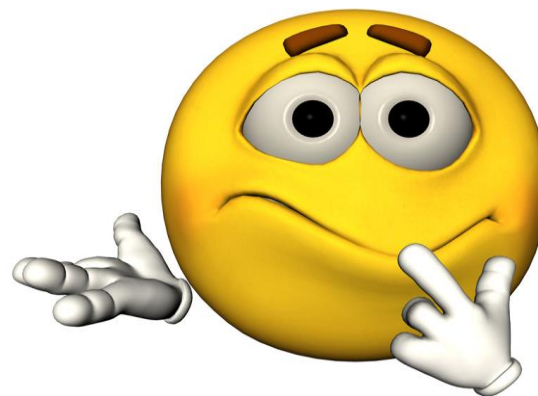
В отдельных периодах наблюдаются наибольшие отклонения результатов модельных расчетов от фактических данных: в 2001 г., 2004 г., 2009 г. и в 2012 году.

## Основные причины таких отклонений:

- **2001 г.** – начало реформирования электроэнергетики РФ, дооценка стоимости активов всех участников рынка ээ, отдельное ценообразование на услуги сетевых организаций и для производителей ээ(м), формирование на оптовом рынке сектора «свободной» торговли (так называемый рынок «5-15»), введение механизмов стимулирования инвестиций в отрасль
- **2004 г.** – упорядочена процедура выхода крупных потребителей на оптовый рынок (ФОРЭМ), что привело к снижению темпов роста цен на ээ для пром. потребителей (50% в объеме потребления)
- **2009 г.** – увеличение доли либерализации цен в электроэнергетике до 50%, частичный переход сетевых компаний на регулирование тарифов на услуги по передаче ээ методом RAB, что, несмотря на экономический кризис и падение объема электропотребления, привело к росту розничных цен на электроэнергию
- **2012 г.** – изменения в ценообразовании для конечных потребителей электроэнергии в части исключения с 1 апреля 2012 г. возможности для энергосбытовых организаций получения нерегулируемого дохода от продажи мощности на розничных рынках ээ (снижение розничной цены на ээ - на 3,5%)

# Справочно: выборы президента Российской Федерации

2000, 2004, 2008 и 2012

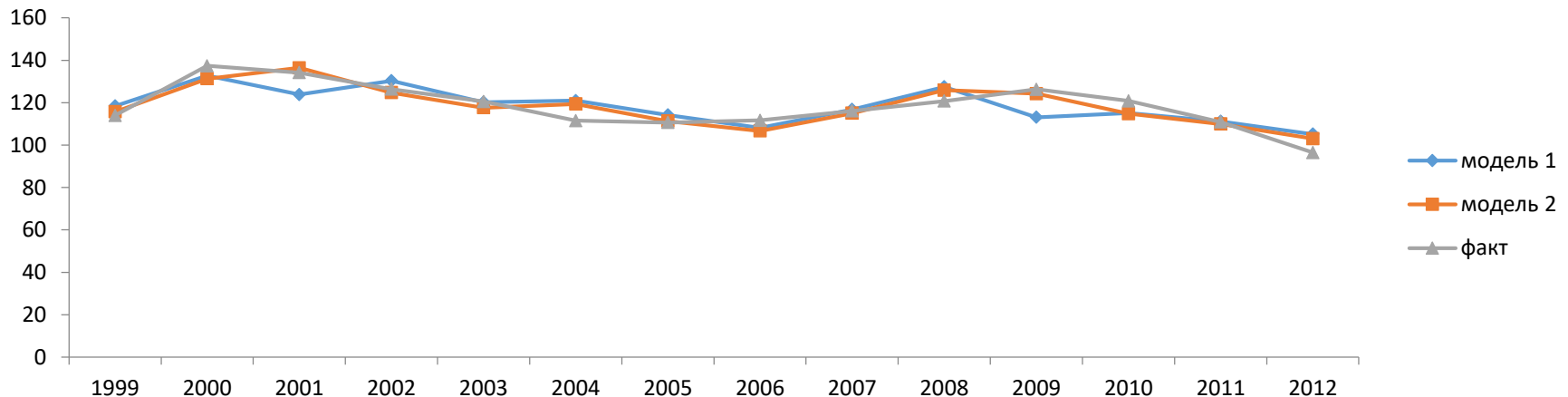


# Доностройка модели

$$\hat{y} = 3,45 + 0,461x_1 + 0,258x_2 + 0,235x_3 + 14,992x_4 \text{ (модель 2)}$$

X4 -дополнительная фиктивная переменная, где «1» - наличие существенного изменения принципов ценообразования, «0» - отсутствие таковых

Годами наступления существенных изменений в правилах рынка электроэнергии будем считать 2001 и 2009 годы – периоды начала реформирования электроэнергетики и увеличение доли либерализации цен соответственно



$R^2 = 0,827$ , существенно выше полученного ранее (0,586)

С вероятностью 95% значимы коэффициенты при переменных, характеризующих темпы роста цен на топливо (X1 и X2) (как и в уравнении 1) и манекенной переменной «наличие изменений правил ценообразования на рынке электроэнергии» (X4). Коэффициенты при переменной X3 и при свободном члене, также как и в уравнении 1, оказались незначимыми при заданном уровне надежности.

**Спасибо за внимание!**

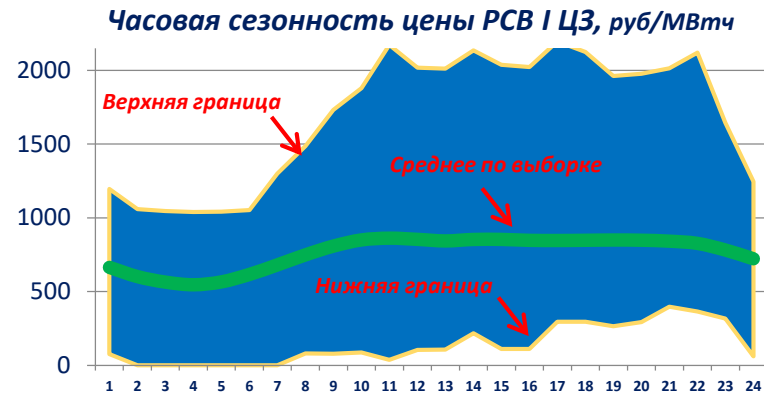
# Приложение

# Анализ факторов

## Большая степень сезонности

Маржинальность ценообразования на рынке определяет ключевую роль спроса в ценообразовании РСВ и БР. Колебания спроса связаны с следующими сезонными факторами:

- час операционных суток;
- день недели;
- выходной или праздничный день;
- рабочий день.



## Исторические данные

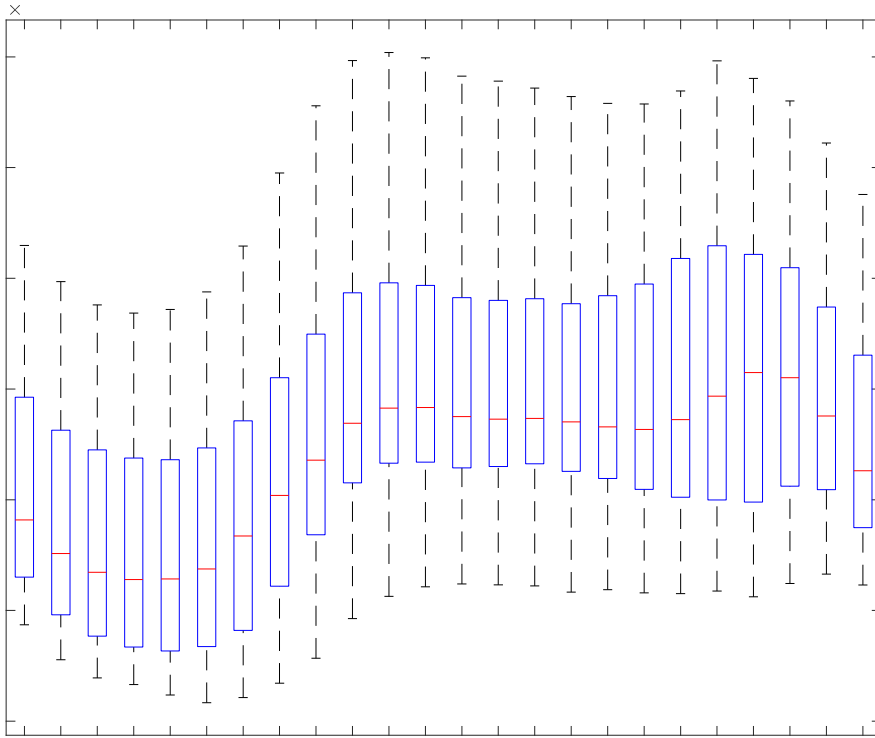
Значение цены в предшествующий час в определенной степени определяет будущую динамику цены. Как правило, резкие скачки цены могут долго «удерживаться» на рынке. Также, цена РСВ сильно связана с сезоном года. От месяца к месяцу наблюдается определенная тенденция к увеличению или снижению цены.

- значение показателей в предшествующий час;
- значение показателей в аналогичный час на предшествующей неделе.

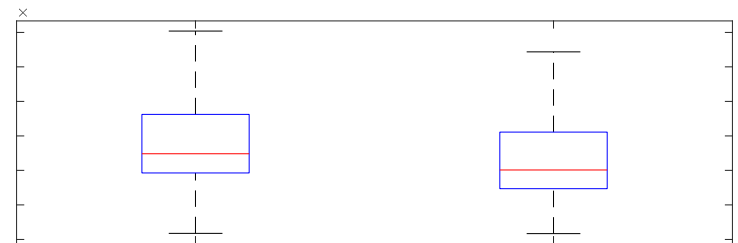
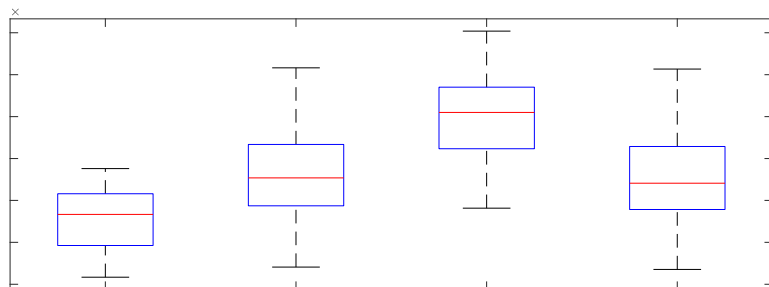
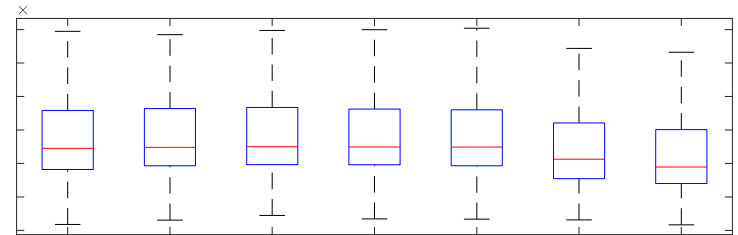
## Другие факторы

Приведённые выше факторы в неполной мере объясняют изменение цены РСВ. Например, климатический фактор вносит значительный вклад в динамику цены, поскольку определяют не только сам спрос, но и технологию производства (комбинированный цикл, генерация на ГЭС). Стоимость энергоресурсов также оказывает влияние на предельные издержки электростанций. В исторический анализ целесообразно включить такие параметры как **объём спроса, температура, водность рек и т.д.** Но прогнозирование многих системных параметров является достаточно сложной задачей.

# Сезонные факторы спроса

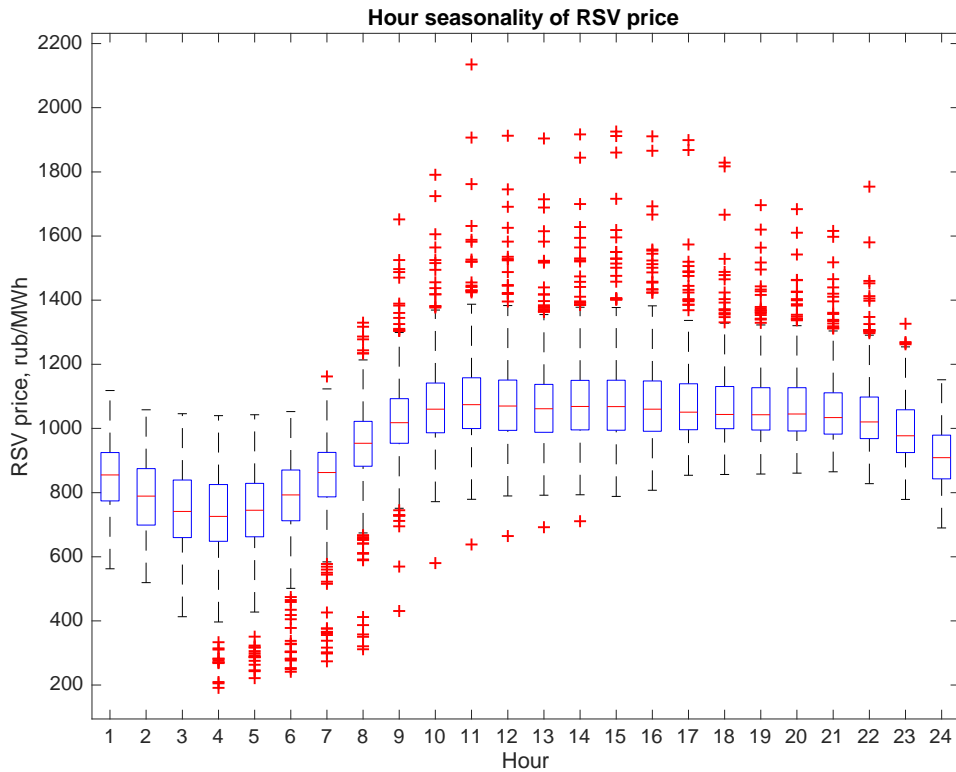


- ✓ Для спроса характерная яркая степень сезонности
- ✓ Наиболее ярко выражена часовая сезонность и сезон года.
- ✓ День недели и тип дня также вносят свой вклад

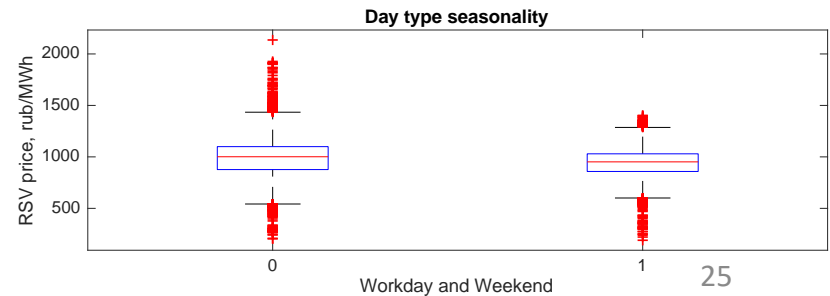
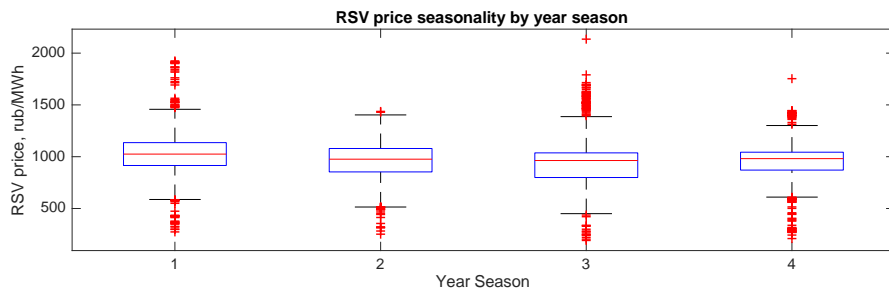
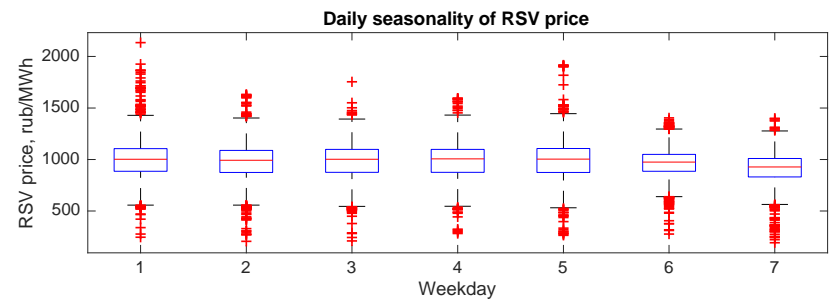




# Сезонные факторы цены РСВ

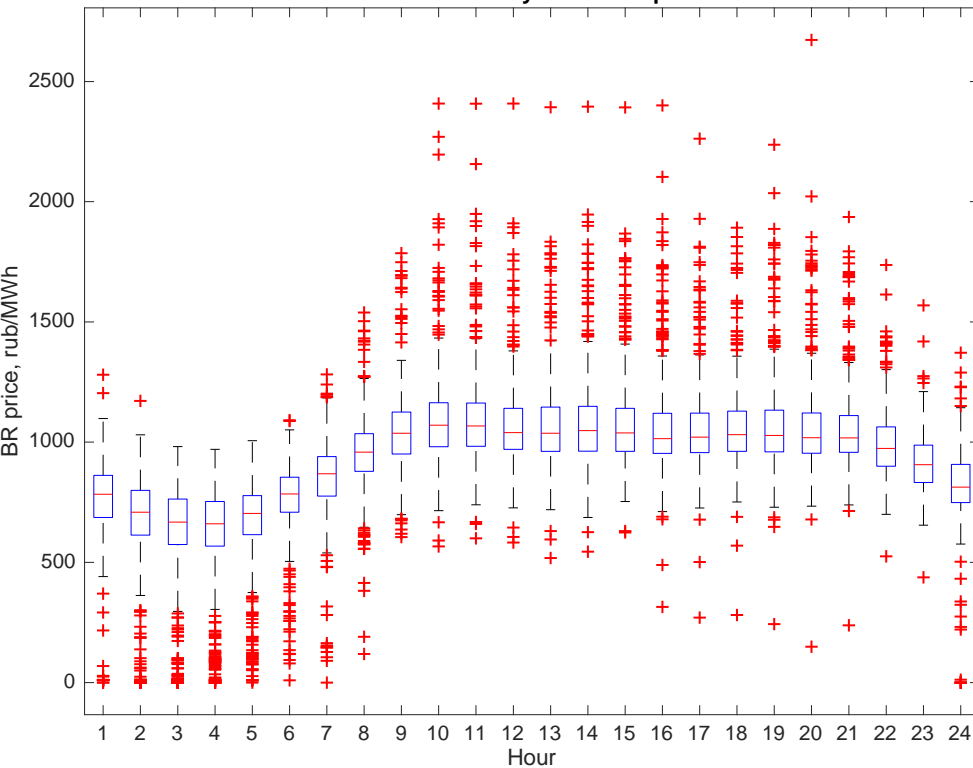


- ✓ Для цены РСВ также характерна яркая степень сезонности
- ✓ Наиболее ярко выражена часовая сезонность. Для большинства времени суток характерны аномалии
- ✓ День недели и тип дня также вносят свой вклад. Ощутима разница в числе аномалий



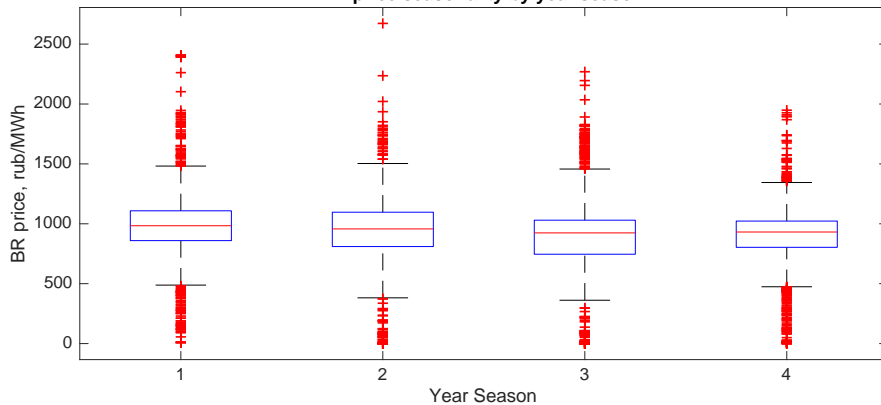
# Сезонные факторы цены БР

Hour seasonality of RSBRV price

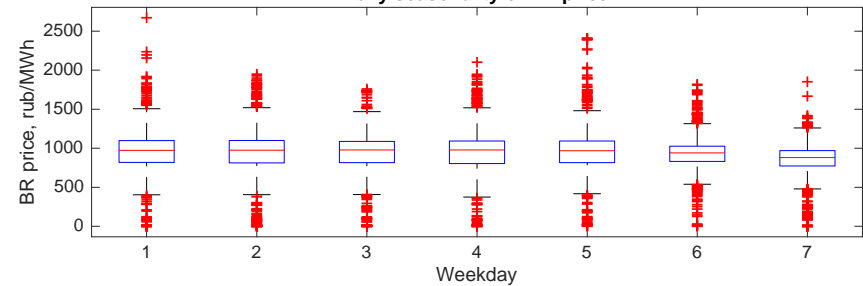


- ✓ Для цены БР также характерна сезонности
- ✓ Наиболее ярко выражена часовая сезонность, где число аномалий значительно больше, чем у цены РСВ
- ✓ День недели и тип дня также вносят свой вклад

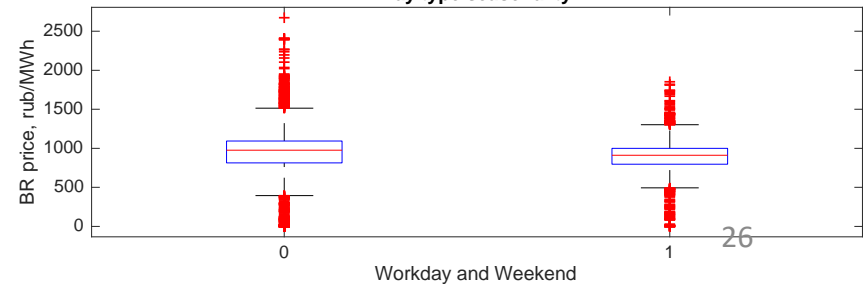
BR price seasonality by year season



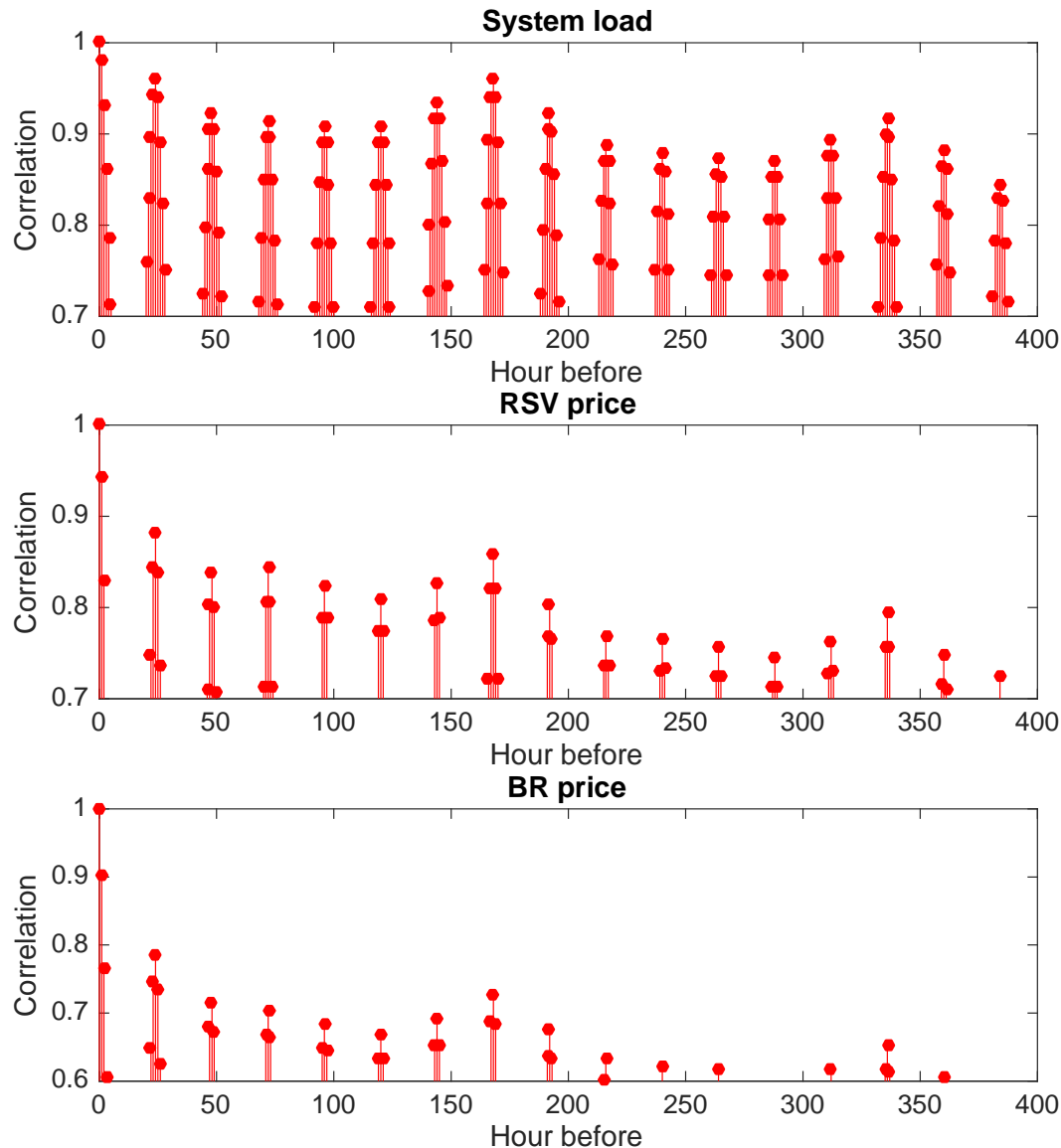
Daily seasonality of BR price



Day type seasonality



# Выбор исторических факторов



- ✓ Для всех трех анализируемых показателей характерна высокая взаимосвязь текущего значения с исторической динамикой
- ✓ Наиболее выраженная корреляция с историческими данными наблюдается со значениями в предшествующий показателей час, 24 часа и неделю назад
- ✓ Для каждого показателя выбран одинаковый набор исторических факторов

# Определение равновесной цены по результатам конкурентного отбора на РСВ и БР

