



**РАНХиГС**  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ИНСТИТУТ  
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ  
ПОЛИТИКИ  
имени Е. Т. ГАЙДАРА

ИНСТИТУТ ОТРАСЛЕВЫХ РЫНКОВ И ИНФРАСТРУКТУРЫ

# Моделирование спотовых цен на электроэнергию на оптовом рынке в России

Касьянова Ксения

# Цели и задачи

## Цель:

- ▶ разработка модели ценообразования на оптовом рынке электроэнергии (РСВ), учитывающей особенности российского рынка;
- ▶ оценка влияния принятия различных решений и изменений факторов на цену на электричество и финансовые риски участников рынка электрической энергии.

## Гипотеза:

- ▶ построив математическую модель, описывающую цену на электроэнергию как диффузионно-скачкообразный процесс, учитывающую также экономические (фундаментальные) факторы, влияющие на спрос и предложение на рынке электроэнергии, можно проследить, как отразится их изменение на финансовые риски этого актива.

# Цели и задачи

## Задачи:

- ▶ выявление факторов влияющих на цены на электричество, особенностей российского рынка;
- ▶ выбор подходящей модели, способной учесть неодинаковое влияние факторов на различные компоненты процесса (тренд, сезонность и стохастические компоненты);
- ▶ оценивание моделей, сравнение с бенчмарк-моделями (не байесовскими/не стохастическими);
- ▶ выбор событий/решений/политик повлиявших на факторы, включенные в модель, сравнение рисков до/после.

## Актуальность:

- ▶ около 72% производимой электроэнергии продается на рынке на сутки вперед (PCB);
- ▶ прямая связь с задачей ценообразования производных финансовых инструментов, необходимых для хеджирования финансовых рисков.

# Российский оптовый рынок электричества



Рис.: Ценовые зоны

# Российский оптовый рынок электричества

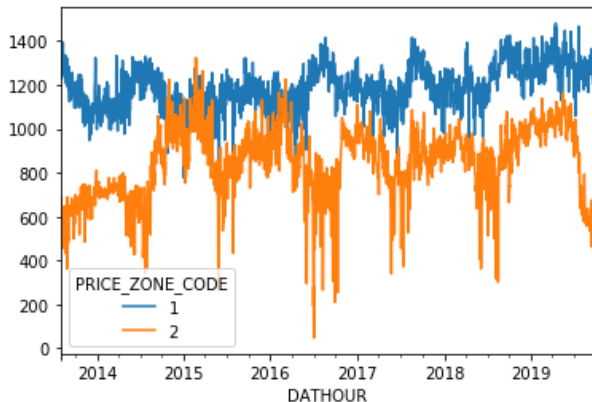


Рис.: Спотовые цены (усредненные за день) для 1 и 2 ценовой зон, руб./МВт.ч

# Российский оптовый рынок электричества



Рис.: Спотовые цены (усредненные за месяц) для 1 и 2 ценовой зон, руб./МВт.ч.  $\text{corr}(p_1, p_2) = 0.07$

# Анализ предметной отрасли

Авторы, год	Название работы	Результат
Judio Lucia, Eduardo Schwartz (Review of Derivatives Research, 2002)	<a href="#">Electricity Prices and Power Derivatives: Evidence from the Nordic Power Exchange</a>	Эмпирическая оценка детерминистической сезонной компоненты в одно- и двухфакторной модели цен на электричество.
Álvaro Cartea, Marcelo G. Figueroa (Applied Mathematical Finance, 2005)	<a href="#">Pricing in Electricity Markets: a mean reverting jump diffusion model with seasonality</a>	Применение модели цен на электричество, учитывающую тенденцию возвращения к среднему, скачкообразность и сезонность процесса.
Maciej Kostrzewski, Jadwiga Kostrzewska (Energy Economics, 2019)	<a href="#">Probabilistic Electricity Price Forecasting with Bayesian Stochastic Volatility Models</a>	Прогнозирование спот-цен на электричество с помощью байесовского подхода позволяет учесть неопределенность в распределении коэффициентов параметров, что улучшает прогнозы в сравнении с классическими моделями.

# Модель Мертона (Merton's Jump-Diffusion Model)

Базовая модель описывающая цену на электричество [Kostrzewski and Kostrzewska (2019)]:

- ▶ эмпирическое распределение имеет тяжелые хвосты, что не согласуется со стандартной моделью Блэка-Шоулза
- ▶ в модель добавляется отдельная компонента, отвечающая за скачкообразность процесса.

Пусть  $S_t$  - цена в момент  $t$ .

Риск-нейтральный диффузионно-скачкообразный процесс (jump-diffusion process), описывающий изменение цены на электричество:

$$dS_t/S_t = (r - \lambda \bar{k})dt + \sigma dW_t + k dq_t.$$

где  $\sigma$  - волатильность диффузионной компоненты, при  $\lambda = 0$  получаем модель Блэка-Шоулза.

Скачки порождены составным процессом Пуассона  $q_t$  с параметром  $\lambda$ , где  $k$  - размах случайного скачка (логнормально распределенный):

$$\ln(1 + k) \sim N(\gamma, \delta^2)$$

где среднее -  $\bar{k} = E(k) = e^{\gamma + \delta^2/2} - 1$ .



# Модели с детерминистической сезонностью

Применение модели цен на электричество, учитывающую тенденцию возвращения к среднему, скачкообразность и сезонность процесса.

$$\ln S_t = g(t) + Y_t$$

Детерминистическая компонента - сезонность  $g(t)$ , стохастическая компонента  $Y_t$ .

Lucia and Schwartz (2002):

$Y_t$  - процесс, возвращающий среднее (OU process)

$$dY_t = -\alpha Y_t dt + \sigma(t) dW_t$$

Cartea and Figueroa (2005):

$Y_t$  - диффузионно-скачкообразный процесс:

$$dY_t = -\alpha Y_t dt + \sigma(t) dW_t + J dq_t$$

$J$  - величина скачка,  $q$  - пуассоновский процесс.

# Основные экономические модели ценообразования на рынке электричества

- ▶ моделирование с учетом фундаментальных факторов (физических/экономических)
- ▶ модели типа Курно (в результате - цены выше чем в действительности)
- ▶ моделирование совокупной функции предложения (необходимо решить систему дифференциальных уравнений, вычислительно затратно, не уделяется внимание резким всплескам)
- ▶ моделирование поведения групп агентов (необходимо для выявления сложных зависимостей, применяется совместно с другими моделями, высокие риски моделирования, так как согласование с теоретической моделью и эмпирическими наблюдениями сильно зависит от предпосылок и понимания настоящей структуры рынка)

# Особенности рынка электричества

- ▶ невозможность хранения => проблема обязательства энергоустановки (unit commitment), учитывается при моделировании цены фьючерсного контракта (так как невозможно открыть короткую позицию).
- ▶ проблема с ограничениями ЛЭП (проблема решается единым оператором), возможность перенапряжения сети (в таком случае локальные цены отличаются от общеустановленных по системе)
- ▶ цены на электричество определяются на РСВ, т.е. отсутствует непрерывность торговли, решения на все сутки принимаются на основании одного и того же информационного множества
- ▶ невозможность перераспределить волатильность цен по производственной цепочке
- ▶ цены имеют три уровня циклических колебаний: ежедневная, недельная, годовая (с резкими всплесками в январе)
- ▶ причины энергетических кризисов: изменения налогообложения, рыночные манипуляции, устаревшая инфраструктура, провалы рынка, национализация, излишняя зарегулированность, перебои с поставками топлива, резкое изменение климата, доставка электричества дешевле стоимости производства

# Факторы спроса и предложения

На равновесие на рынке электричества влияет

- ▶ погодные условия (причем при более точном прогнозировании погодных условий можно уменьшить ошибку прогноза цены на электричество)
- ▶ уровень деловой активности (ежедневной и общего тренда)
- ▶ доля ВИЭ (зависимых от погодных условий)
- ▶ решения принимаемые экономическими агентами (при оптимизации)
- ▶ цены на ресурсы
- ▶ государственная политика, новости
- ▶ другие фундаментальные факторы влияющие на баланс спроса и предложения

- ▶ Цены на электричество зависят от большого числа различных компонент.
- ▶ Для прогнозирования используется SV модель с экзогенными переменными и дамми-переменными, например, температура, объемы торгов по выходным и понедельникам.
- ▶ В модели скачки вверх/вниз распределены экспоненциально, с разными параметрами.
- ▶ С помощью байесовского подхода можно оценить ненаблюдаемые компоненты модели.

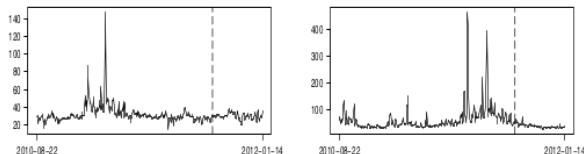
SVDEJX модель:

$$\begin{aligned}y_{t_{i+1}} &= y_{t_i} + \mu + \psi X_{t_{i+1}} + d_{Sat} D_{Sat,i+1} + d_{Sun} D_{Sun,i+1} + d_{Mon} D_{Mon,i+1} \\&\quad + \sqrt{\exp(h_{t_i})} \varepsilon_{t_{i+1}}^{(1)} + J_{t_{i+1}}, \\h_{t_{i+1}} &= h_{t_i} + \kappa_h (\theta_h - h_{t_i}) + \sigma_h \left( \rho \varepsilon_{t_{i+1}}^{(1)} + \sqrt{1 - \rho^2} \varepsilon_{t_{i+1}}^{(2)} \right), \\J_{t_{i+1}} &= -\xi_{t_{i+1}}^D \cdot \mathbb{I}(q_{t_{i+1}} = -1) + 0 \cdot \mathbb{I}(q_{t_{i+1}} = 0) + \xi_{t_{i+1}}^U \cdot \mathbb{I}(q_{t_{i+1}} = 1),\end{aligned}$$

$\rho > 0$ , если большим значениям математического ожидания соответствуют большие значения дисперсии

Данные: Спотовые цены JCPL (Jersey Central Power and Light Company), находящейся в первой ценовой зоне, определяемой сетевым оператором PJM Interconnection.

08/22, 2010 - 01/14, 2012



**Рис.:** Спотовые цены на 4 часа (не-пиковый час) и 16 часов (пиковый час), USD/MWh

PI(%)	ARX	SNARX	SIMPLE	LAD	QRA	B.Q	B.HPD
Unconditional coverage							
50	69.74	56.51	58.63	56.36	53.55	<b>53.33</b>	<b>53.22</b>
90	96.13	94.23	94.44	93.64	92.07	<b>90.28</b>	<b>90.72</b>
Mean (standard deviation) of the PI width							
50	8.63 (3.33)	6.09 (2.64)	6.32 (2.89)	6.73 (3.66)	6.4 (3.78)	<b>5.6</b> (4.02)	<b>5.52</b> (3.91)
90	21.28 (8.29)	20.73 (8.78)	25.73 (15.74)	26.2 (17.21)	21.1 (12.09)	<b>16.08</b> (11.15)	<b>15.79</b> (10.71)
Median (inter-quartile range) of the PI width							
50	8.66 (5.25)	5.94 (4.21)	5.89 (5.77)	5.79 (6.93)	5.62 (5.19)	<b>4.37</b> (3.86)	<b>4.29</b> (3.79)
90	21.34 (13.02)	20.64 (15.28)	23.22 (25.86)	21.87 (26.33)	19.51 (18.51)	<b>12.88</b> (10.63)	<b>12.70</b> (10.43)

Рис.: Сравнение ширины доверительных интервалов прогноза, полученных по байесовским (B\_Q, B\_HPD) и не байесовским моделям

# Специфика российского рынка

Классификация рынков электроэнергии и мощности России

		Тип рынка		
		Оптовый рынок		Розничный рынок
Тип товара	Электроэнергия	Рынок на сутки вперед	Балансирующий рынок	Рынок нерегулируемых цен
		Рынок регулируемых договоров	Рынок свободных договоров	Рынок регулируемых цен
	Мощность	Рынок регулируемых договоров	Договоры о предоставлении мощности (ДПМ)	Рынок нерегулируемых цен
		Рынок свободных договоров	Конкурентный отбор мощности	Рынок регулируемых цен
		Реализация в статусе вынужденного генератора		



# Специфика ценообразования на российском рынке

Тариф для конечного потребителя на электроэнергию и мощность формируется на основе пяти составляющих:

- ▶ цена электроэнергии (цена покупки электроэнергии на оптовом рынке или у розничного генератора);
- ▶ цена мощности (цена покупки мощности энергосбытовой компанией на оптовом рынке или у розничного генератора);
- ▶ цена передачи по сети с дифференциацией по уровню напряжения: тарифы ФСК на передачу по магистральным сетям, тарифы МРСК на передачу по сетям среднего напряжения и тариф ТСО на передачу по сетям низкого напряжения;
- ▶ инфраструктурные платежи: плата за услуги СО ЕЭС, АТС, ЦФР. Размер платы регулируется ФАС России и Ассоциацией «НП Совет рынка»;
- ▶ сбытовая надбавка.

# Несовершенства российского рынка

- ▶ Высокая степень изношенности основных фондов.
- ▶ Перекрестное субсидирование (частичный перенос платежного бремени с населения на промышленность).
- ▶ Проблема неплатежей (на конец октября 2017 года на оптовом рынке задолженность составила 65,2 млрд руб., а на розничном — 243 млрд руб).
- ▶ Вынужденная генерация (ТЭЦ неэффективны на рынке электроэнергии, мощности, работающие в режиме вынужденной генерации, оплачиваются по существенно более высокой цене, чем рыночная).
- ▶ Высокие потери тепла.
- ▶ Завершение ДПМ и продление ДПМ ВИЭ.

Данные по ценам на электричество за каждый час, начиная с 1.08.2013 по двум ценовым зонам:

- ▶ Объем полного планового потребления, МВт.ч
- ▶ Индекс равновесных цен на покупку электроэнергии, руб./МВт.ч.
- ▶ Объем покупки по регулируемым договорам, МВт.ч
- ▶ Объем покупки на РСВ, МВт.ч
- ▶ Объем продажи в обеспечение РД, МВт.ч

Источник: АТС

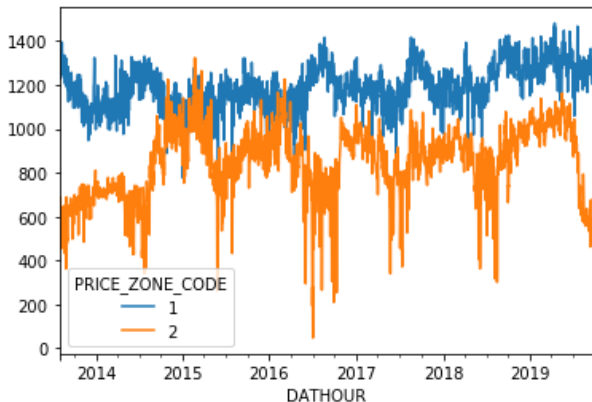


Рис.: Спотовые цены (усредненные за день) для 1 и 2 ценовой зон, руб./МВт.ч

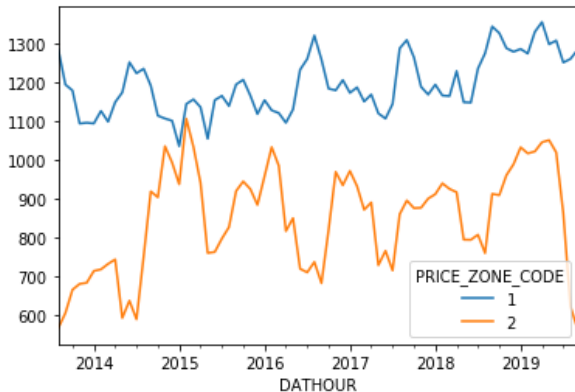


Рис.: Спотовые цены (усредненные за месяц) для 1 и 2 ценовой зон, руб./МВт.ч.  $\text{corr}(p_1, p_2) = 0.07$



**Рис.:** Разница дневных объемов планового предложения и потребления электроэнергии для 1 и 2 ценовой зон, МВт.ч.