



**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, а также объяснить различия динамики цен в ценовых зонах.

# Цели и задачи

## Задачи:

- ▶ описание принципа функционирования оптового рынка электроэнергии;
- ▶ 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 (РСВ);
- ▶ прямая связь с задачей ценообразования производных финансовых инструментов, необходимых для хеджирования финансовых рисков.

1. принцип работы ОРЭМ
2. выбор факторов, влияющих на цены:
  - 2.1 особенности рынка электричества
  - 2.2 особенности российского рынка
  - 2.3 выбор ценовых факторов, включаемых в модель
3. моделирование цены как диффузионно-скачкообразного процесса



# Российский рынок электроэнергии и мощности

## 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»;
- ▶ надбавка сбытовых компаний (кроме участников оптового рынка).

Рис.: Ценовые зоны. Источник: АТС

Рис.: Зоны свободного перетока мощности оптового рынка. Источник: ПЕРЕТОК.РУ

\* С точки зрения энергорынка, разделение на ЗСП по-прежнему учитывается только при определении вынужденной генерации, при этом используется базовый перечень ЗСП.



# Российский оптовый рынок электричества

- ▶ При формировании поузловых модельных пар <цена-количество> СО определяет на основе ценовых заявок на планирование объемов производства в отношении групп точек поставки (ГТП) генерации объемы электрической энергии, заявленные Участниками оптового рынка в отношении каждой ГТП генерации к продаже на сутки вперед, и из этих объемов выделяет объемы (часть объемов) электрической энергии, содержащиеся в зарегистрированных двусторонних договорах, и которые подлежат включению в торговый график в приоритетном порядке, и формирует на эти объемы ценопринимающую часть вместо условий третьего и четвертого приоритета для модельных пар, сформированных АТС при проведении конкурентного отбора на сутки вперед согласно 3-му и 4-му буллитам п.1.2;
- ▶ если ГТП относится к нескольким узлам расчетной модели, СО распределяет объемы электрической энергии, содержащиеся в каждой паре «цена – количество» в ценовой заявке в соответствии с коэффициентами или формулами отнесения объемов к каждому узлу согласно Методике формирования входных и выходных данных при проведении конкурентного отбора БР

Источник: Регламент проведения конкурентного отбора заявок для балансирования системы

# Российский оптовый рынок электричества

СО проводит конкурентный отбор БР и определение диспетчерских объемов, индикаторов стоимости и цен балансирования в соответствии с Математической моделью расчета диспетчерских объемов электрической энергии, индикаторов и цен на балансирование вверх (вниз) в результате конкурентного отбора ценовых заявок БР так, чтобы:

- ▶ в диспетчерские объемы были включены все объемы электрической энергии, не превышающие установленных пределов, относящиеся к соответствующему узлу
- ▶ индикатор в данном узле был не меньше цены, указанной Участником оптового рынка в ценовой заявке на планирование объема отрицательного потребления в отношении ГТП потребления с регулируемой нагрузкой по объекту управления или в ценовой заявке на планирование объема производства в отношении ГТП генерации за объем электрической энергии
- ▶ индикаторы во всех узлах расчетной модели отличались на стоимость нагрузочных потерь электрической энергии и системных ограничений.

Источник: Регламент проведения конкурентного отбора заявок для балансирования системы

# Российский оптовый рынок электричества

## Специальные случаи расчета результатов конкурентного отбора

Если при проведении конкурентного отбора БР для определенного операционного часа в некоторой группе узлов расчетной модели:

- ▶ приняты только ценопринимаящие объемы в заявках на продажу индикаторы в этой группе узлов считаются равными нулю;
- ▶ принята заявка с четвертой (дополнительной) ступенью, с ценой или с модельной ценой, равной десяти тарифам на электроэнергию, для определения индикаторов стоимости на данный час проводится дополнительный расчет, обеспечивающий вычисление индикаторов стоимости по ценам, не превышающих указанной модельной цены и максимальной из цен, указанных в принятых третьих ступенях ценовых заявок участников;
- ▶ оказывается, что для какого-либо часа объемов производства недостаточно для формирования ПБР, удовлетворяющего в этот час остальным СО вправе изменить состав выбранного оборудования;
- ▶ не удастся выполнить действия предыдущего подпункта СО имеет право в установленном порядке ввести ограничения потребления и/или изменить ограничения на перетоки по сечениям экспортно-импортных операций.

Источник: Регламент проведения конкурентного отбора заявок для балансирования системы

Формирование ценовой заявки поставщика для конкурентного отбора РСВ и БР.

Источник: E.ON

Рис.: Определение и фиксация объемов поставки и потребления. Источник: E.ON

# Российский оптовый рынок электричества

## Параметры спроса и предложения электрической энергии

ЦЗ: Европа  
Дата: 12.07.2018  
Час: 10

№	ЦЗ на покупку Цена (руб./МВтч)	Объем (МВтч)	ЦЗ на продажу Цена (руб./МВтч)	Объем (МВтч)
1	*	88253.3619098945	*	83264.25
2	100	1	271	3
3	1900	33.705	300	54
4	2300	41	390	0.999999999999976
5			427	1
6			429	49.66
7			444	1
...			...	...
208			3000	32
209			3500	0.5
210			3860	4.375
211			5490	27
212			5842	2
213			6100	9.5
214			13260	102.652

Источник: АТС

# Российский оптовый рынок электричества

Плановые почасовые объемы потребления, МВтЧ.:

Дата 17.07.2019

ЦЗ: Европа

Час

	...	11-12	12-13	13-14	...
ГП	...	52507.568	52146.723	52444.545	...
не ГП	...	31586.293	31625.01	31707.908	...

Источник: АТС

\* Гарантирующий поставщик обязан заключить с любым обратившимся к нему физическим или юридическим лицом, находящимся в зоне его деятельности, договор энергоснабжения (купли-продажи (поставки) электрической энергии (мощности)).

Рис.: Математическая модель расчета узловых цен по методике АТС.  
Источник: Б.Г. Булатов, В.О. Каркунов (2009)



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

$$\text{corr}(p_1, p_2) = 0.07$$

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

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

# Факторы влияющие на цены на электричество

## 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)

# Факторы влияющие на цены на электричество

## 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, излишняя зарегулированность, перебои с поставками топлива, резкое изменение климата, доставка электричества дешевле стоимости производства

# Факторы влияющие на цены на электричество

## Факторы спроса и предложения

На равновесие на рынке электричества влияют:

- ▶ 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 и ГП, зависимых от погодных условий
- ▶ решения принимаемые экономическими агентами (при решении оптимизационной задачи)
- ▶ цены на ресурсы
- ▶ государственная политика, новости
- ▶ другие фундаментальные факторы влияющие на баланс спроса и предложения

# Факторы влияющие на цены на электричество

## 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.



# Выбор ценовых факторов

## Несовершенства российского рынка

- ▶ (\*\*\*) изменения в составе ценовых зон
- ▶ (\*\*\*)S) погодные условия
- ▶ (\*\*\*)TS) уровень деловой активности
- ▶ (\*\*TS) динамика цен на ресурсы и инфляция
- ▶ (\*\*TJ) инвестиции в энергетику, завершение ДПМ и продление ДПМ ВИЭ
- ▶ (\*J) государственная политика, новости
- ▶ (\*J) аварийность в электросетях и генерации, (ежемесячно или дамами на регионы с высокими рисками нарушения электроснабжения)
- ▶ (\*J) проблема неплатежей
- ▶ (\*) вынужденная генерация
- ▶ (\*) высокие потери тепла.
- ▶ (\*) доля ВИЭ и ГП, зависимых от погодных условий
- ▶ (\*S) коэффициенты сезонности, определенные АТС

# Анализ предметной отрасли

Авторы, год	Название работы	Результат
Judio Lucia, Eduardo Schwartz (Review of Derivatives Research, 2002)	Electricity Prices and Power Derivatives: Evidence from the Nordic Power Exchange	Эмпирическая оценка детерминистической сезонной компоненты в одно- и двухфакторной модели цен на электричество.
Álvaro Cartea, Marcelo G. Figueroa (Applied Mathematical Finance, 2005)	Pricing in Electricity Markets: a mean reverting jump diffusion model with seasonality	Применение модели цен на электричество, учитывающую тенденцию возвращения к среднему, скачкообразность и сезонность процесса.
Maciej Kostrzewski, Jadwiga Kostrzewska (Energy Economics, 2019)	Probabilistic Electricity Price Forecasting with Bayesian Stochastic Volatility Models	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.

## **Stochastic volatility model with a double exponential distribution of jumps, a leverage effect and exogenous variables:**

- ▶ 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  $(q_{t_i}, \xi_{t_{i+1}}^D, \xi_{t_{i+1}}^U, h_{t_i})$ .

SVDEJX\* модель:

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

$y_{t_i} = \ln(S_{t_i})$  – логарифм цены

$h_{t_i} = y_{t_{i+1}} - y_{t_i}$  – логарифм цены

$X_{t_{i+1}}$  – логарифм почасовой температуры

$D_{Sat,i+1}, D_{Sun,i+1}, D_{Mon,i+1}$  – учитывают недельную сезонность

$q_{t_i}$  – наличие скачка вверх/вниз (значения переменной ненаблюдаемы, но можно оценить вероятность скачка)

$\epsilon_{t_{i+1}}^{(1)}, \epsilon_{t_{i+1}}^{(2)} \sim N(0,1) \text{ i.i.d.}, \xi_{t_{i+1}}^D \sim \text{Exp}(\eta_D) \text{ i.i.d.}, \xi_{t_{i+1}}^U \sim \text{Exp}(\eta_U) \text{ i.i.d.}$

$\rho < 0$  – параметр "рычага",  $\rho > 0$  – обратный параметр "рычага" (если большим значениям логарифма цены 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

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