Особенности выбора состава включенного генерирующего оборудования в российском энергорынке

Андрей Винников, старший эксперт НП Совет рынка
a.vinnikov@np-sr.ru
июль 2018 г

Место ВСВГО в российском рынке электроэнергии

Этапы планирования на оптовом рынке в России:

- Ввод новых мощностей: горизонт – 15 лет вперед, фиксирует обязательства по вводу новых мощностей, распределяет около 25% стоимости на оптовом рынке

- Конкурентный отбор мощности: горизонт – 4 года вперед, фиксирует обязательства по готовности к выработке, распределяет около 16% стоимости
  - При приближении к периоду поставки, обязательства по мощности уточняются (согласование годового и месячного графика ремонтов)

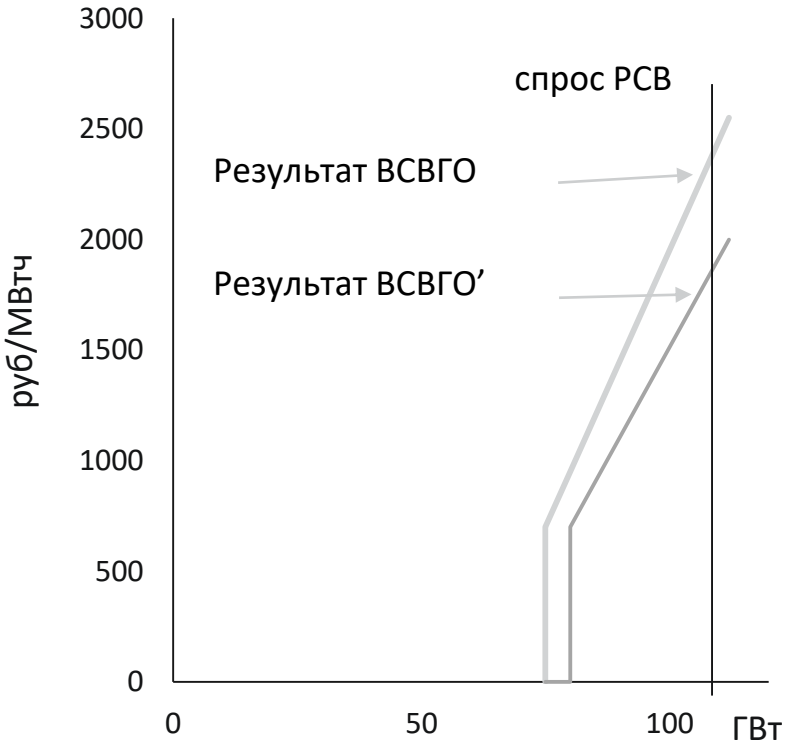
- ВСВГО: горизонт – 5 дней вперед, определяет, какое оборудование будет включено, а какое выключено. Поскольку у оборудования есть ограничения на минимальную нагрузку (Рмин), определяет 78% выработки ТЭС, но не определяет цену

- РСВ: горизонт – 1 день вперед, определяет объем дозагрузки сверх Рмин, а также цену на электроэнергию, распределяет 22% выработки ТЭС и 56% стоимости рынка

- БР: горизонт – 1 час вперед, определяет цену и стоимость отклонений от РСВ (порядка 3% объемов выработки и стоимости)

Влияние ВСВГО на цену электроэнергии в рынке на сутки вперед

- Кривая предложения РСВ формируется по результатам ВСВГО, поэтому ВСВГО оказывает влияние на цены РСВ, выручку генераторов и затраты потребителей в части э/э
  - Увеличение объема включенного оборудования на 1 ГВт снижает цену РСВ примерно на 30 рублей
  - Топливные затраты отобранных в ВСВГО станций определяют ценовую часть кривой предложения РСВ, меняющуюся в диапазоне от 700 до более чем 3000 руб/МВтч
- В связи со значительным влиянием результатов ВСВГО на цену РСВ, предложения по изменениям процедуры ВСВГО, как правило, вызывают дебаты поставщиков и потребителей



На различных рынках электроэнергии используются два основных подхода к выбору включенного оборудования

Самобалансирование

- Генераторы самостоятельно определяют целесообразность включения своего оборудования
- Причиной для работы могут быть ранее заключенные двусторонние договоры или высокие спотовые цены
- О своем решении включиться или выключиться генераторы предварительно уведомляют Системного оператора
- Если Системный оператор предполагает превышение потребления над объемом заявленного к работе оборудования, он проводит конкурс на включение дополнительных объемов

Nord Pool, Великобритания, Австралия

Централизованный отбор

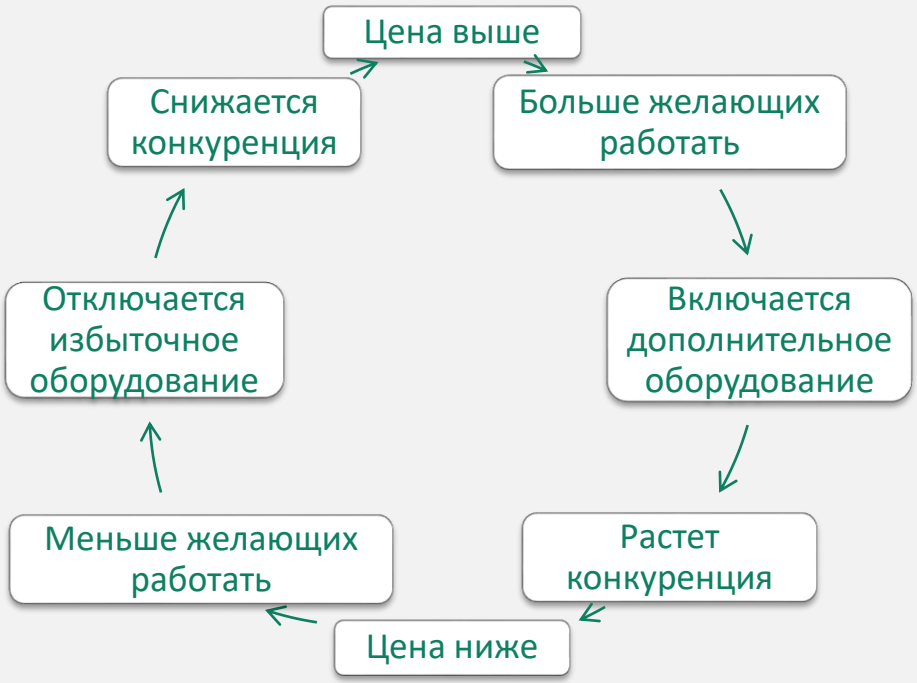
- Генераторы подают Системному оператору заявки на работу, содержащие пары «цена-количество», а также величины пусковых и других затрат, связанных с выработкой э/э
- Системный оператор отбирает к работе объем генерации, необходимый для покрытия спроса
- Принципом отбора является минимизация совокупных затрат генераторов на производство необходимого объема электроэнергии

PJM, New England

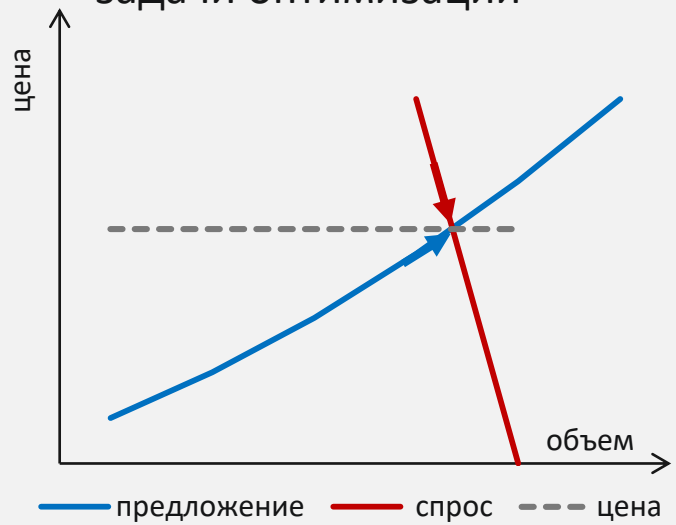
Оба подхода ведут к формированию равновесной цены и обеспечивают эффективное производство

Механизм равновесия

Самобалансирование: равновесие – динамическое



Централизованный отбор: равновесие – точное решение задачи оптимизации



Равновесие, достигнутое в ВСВГО, транслируется в РСВ за счет единства ценовых заявок

Эффективность производства достигается за счет того, что генераторы, имеющие себестоимость выше равновесной цены, не заинтересованы быть в работе

В российской модели ВСВГО существуют особенности

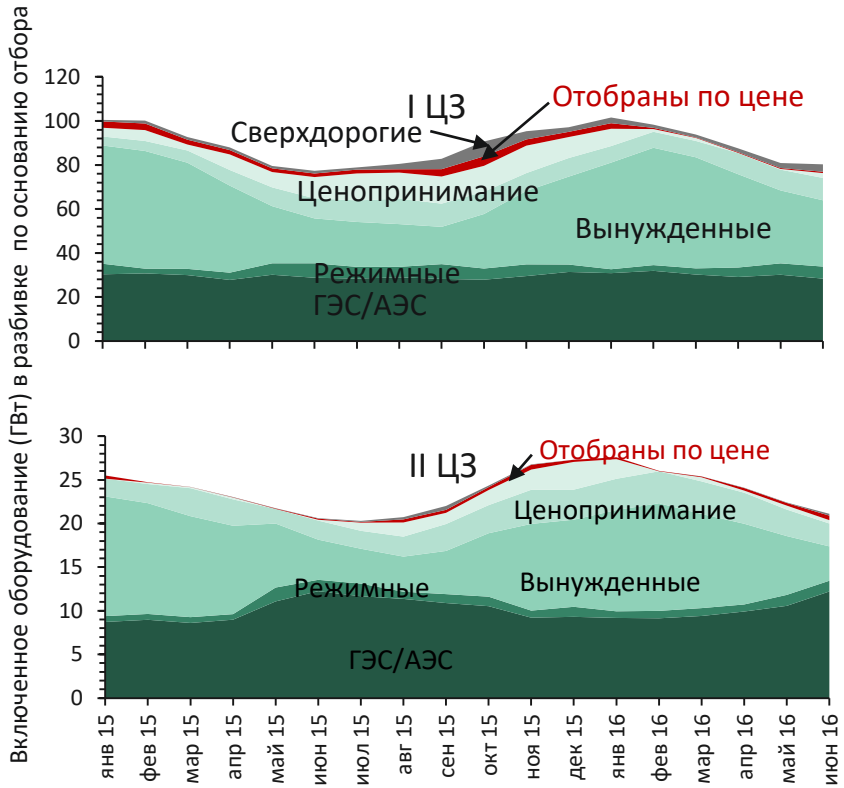
- Формально реализован централизованный отбор, однако:
  - Значительный объем оборудования ТЭС отбирается «вне конкурса» (вынужденные)
  - Отбор производится не под профиль нагрузки, а под максимальную нагрузку
  - Не учитываются затраты холостого хода
  - Заявки ВСВГО и РСВ по факту несогласованы друг с другом
  - Для отобранных в оптимизационной процедуре отсутствует гарантия компенсации топливных затрат (цены формируются в РСВ, а не ВСВГО)

- По сути, процедура более похожа на самобалансирование: поставщики в основном подают в ВСВГО заявки с ценой 0 либо 20000 руб/МВтч (максимально дупустимая цена в рынке), т.е. говорят «хочу работать» либо «не хочу работать»
  - Тем не менее, не все подавшие ценопринимающие (с ценой 0) заявки включаются, и не все подавшие заявки с ценой 20000 рб/МВтч не включаются. Таким образом, самобалансированием процедура ВСВГО также не является

Особенности российского рынка сформировались в результате компромисса между предложениями поставщиков и потребителей по формированию регламентов рынка

Любые изменения процедуры ВСВГО, в том числе ставящие задачей повышение эффективности производства, серьезно затруднены в связи с тем, что результат ВСВГО сильно влияет на цену РСВ. Такие изменения не согласовываются либо поставщиками (если ведут к снижению цены), либо потребителями (если ведут к ее повышению)

Проблемы сегодняшней модели: только незначительная часть оборудования выбирается исходя из оптимизации



- По объективным причинам в ВСВГО отбирается относительно небольшой объем генерации
  - Среднегодовой объем объективно дешевой атомной, гидравлической и тепловой генерации составляет около 85 ГВт[1] . Этот объем не выбирается в ВСВГО
  - Задачей ВСВГО является выбор примерно 32ГВт тепловой (в основном конденсационной) генерации из 70 ГВт способной к выработке (не находящейся в ремонте)
- Из 32 ГВт ТЭС, отбираемых по процедуре оптимизации, только 2-3 ГВт проходят по заявки с ценой в диапазоне 300-3000 руб/МВтч (которая может отражать экономически обоснованные затраты).
  - Более 90% мощностей были отобраны после подачи ценопринимающих или «запретительных» заявок, не отражающих затраты

[1]ГЭС учтены по средней выработке

Проблемы сегодняшней модели: оптимизация под Рмакс, а не под спрос

Пример обеспечения 100 МВт спроса с оптимизацией под Р макс

Рмакс: 100 МВт
Удельные затраты:
1000 руб./МВтч
Затраты на 100 МВт:
100 000 руб.

Рмакс: 130 МВт
Удельные затраты:
800 руб./МВтч
Затраты на 100 МВт:
80 000 руб.

Рмакс: 150 МВт
Удельные затраты:
700 руб./МВтч
Затраты на 100 МВт:
70 000 руб.

$$\sum_{d}\sum_{t\in d}\sum_{g}\{\sum_{b\in g\cap B_{opt}}\{\hat{\Delta}_b\hat{P}_b^{\max}[\delta_{bt}-\delta_{b(t-1)}]^+ + k_b[\delta_{bt}-\delta_{b(t-1)}]^+\} + \sum_{b\in g}\sum_{l=1}^{3}\hat{c}_b^l \boxed{P_{bt}^l} + \sum_{b\in g\in R}\sum_{l=1}^{3}\hat{c}_b^l \boxed{r_{bt}^{l+}}\} \to \min$$

Стоимость пуска

Штраф за пуск

Минимизация стоимости работы на **Рмакс**

Стоимость работы на Рмакс:
100 000руб.

Стоимость работы на Рмакс:
104 000 руб.

Стоимость работы на Рмакс:
105 000 руб.

Вкл.

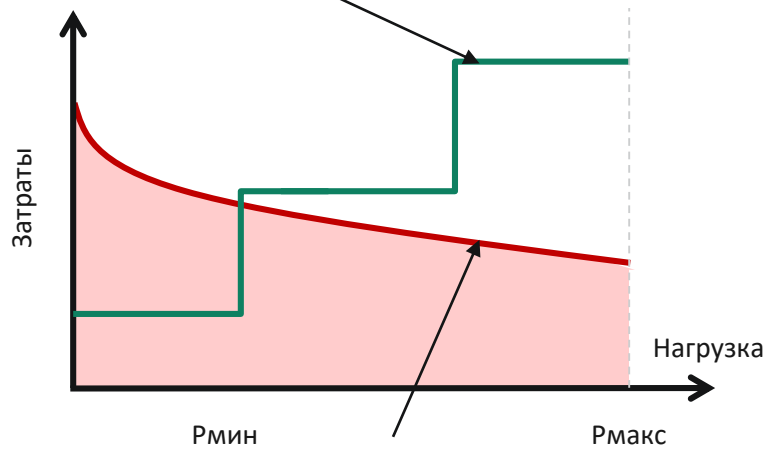
Выкл.

Выкл.

Сегодняшняя модель выбрала наиболее затратное решение

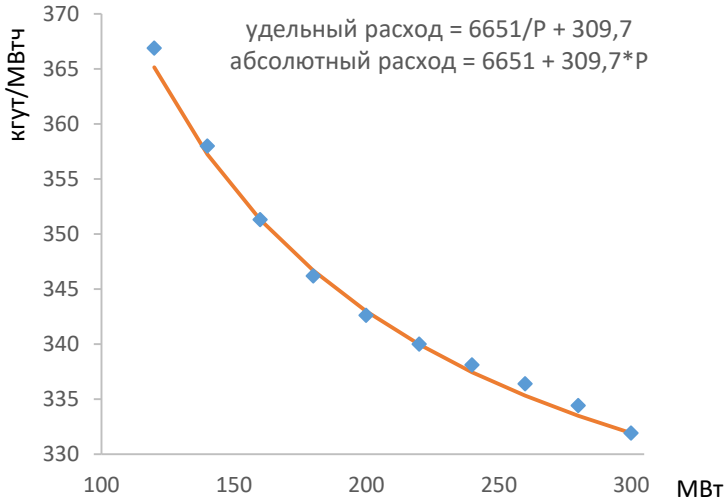
Проблемы сегодняшней модели: не учитываются затраты холостого хода

- В сегодняшней модели ВСВГО заявка генератора должна быть монотонной неубывающей
- Растущие ступеньки отражают переход к более дорогому топливу



- Но затраты – не только цена топлива, но и расход (особенно если нет ограничений по газу)
- Удельный расход топлива максимален в области минимальной нагрузки
- Основная причина этого - затраты холостого хода
- ЗХХ отражают величину трения в опорных подшипниках ротора, потери тепла через корпус котла и турбины и другие не зависящие от нагрузки потери

- Пример: удельный расход топлива для блока К-300

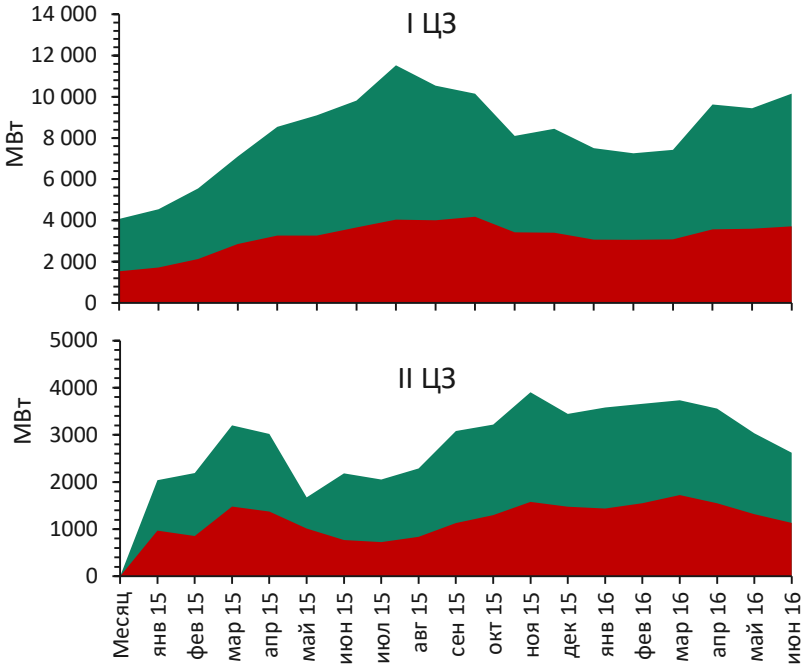


- 6651 (кгут/ч) – затраты холостого хода (не зависят от нагрузки)
- 309,7 (кгут/МВтч) * Р (МВт) – переменные затраты (пропорциональны нагрузке)
  - На Рмакс: 309,7 кгут/МВтч * 300 МВт = 92910 кгут/ч
  - На Рмин: 309,7 кгут/МВтч * 120 МВт = 37164 кгут/ч
- ЗХХ составляют от 7 до 15% топливных затрат

Проблемы сегодняшней модели: несогласованность заявок РСВ и ВСВГО

- Использование уязвимости с 1,5 Руст приводит к ситуациям, когда более дорогая генерация включается на ВСВГО по ценоприниманию, после чего подает ненулевую цену на РСВ
  - Результат ВСВГО утрачивает экономическую обоснованность

- Подача ценовых заявок в ВСВГО в отношении объемов, проходящих сегодня отбор с использованием уязвимости 1,5 Руст, увеличит объемы оптимизации в I ценовой зоне с 1,7 до 11 ГВТ, а во II ценовой зоне – с 0,3 до 3,5 ГВт



Суммарный среднечасовой Рмакс оборудования в РСВ, по которому поставщик занизил объем дешевого предложения (менее 100 руб./Мвт) относительно Заявки ВСВГО;

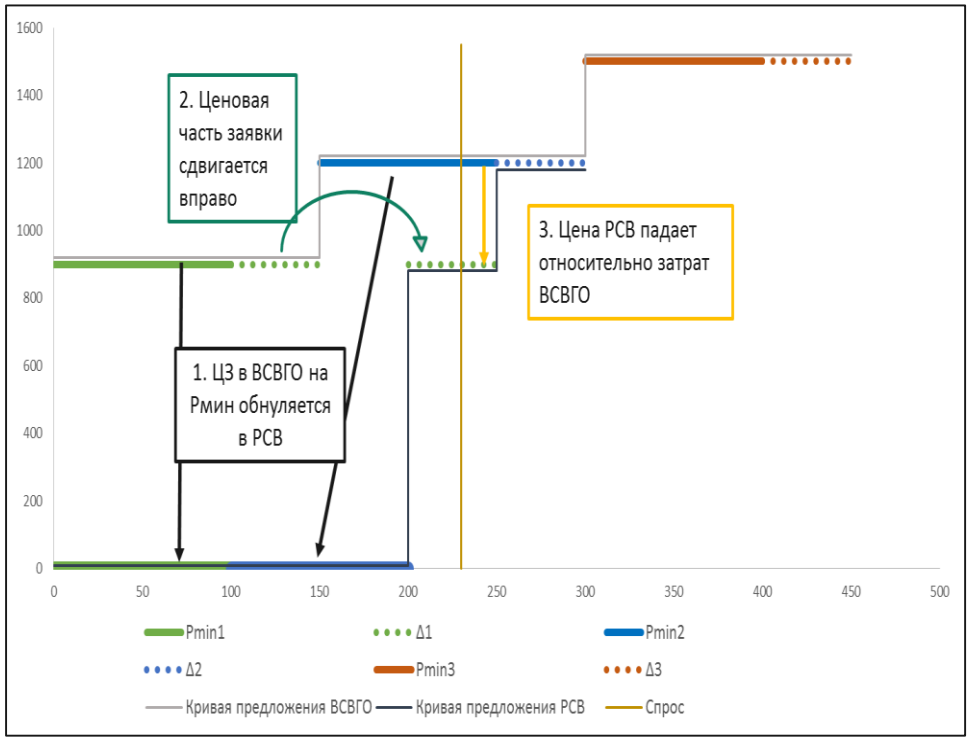
Суммарный среднечасовой объем снижения дешевого предложения (менее 100 руб./Мвт) в заявке РСВ относительно Заявки ВСВГО.

Проблемы сегодняшней модели: отбор и оплата «самых дорогих»

Пример: 3 генератора

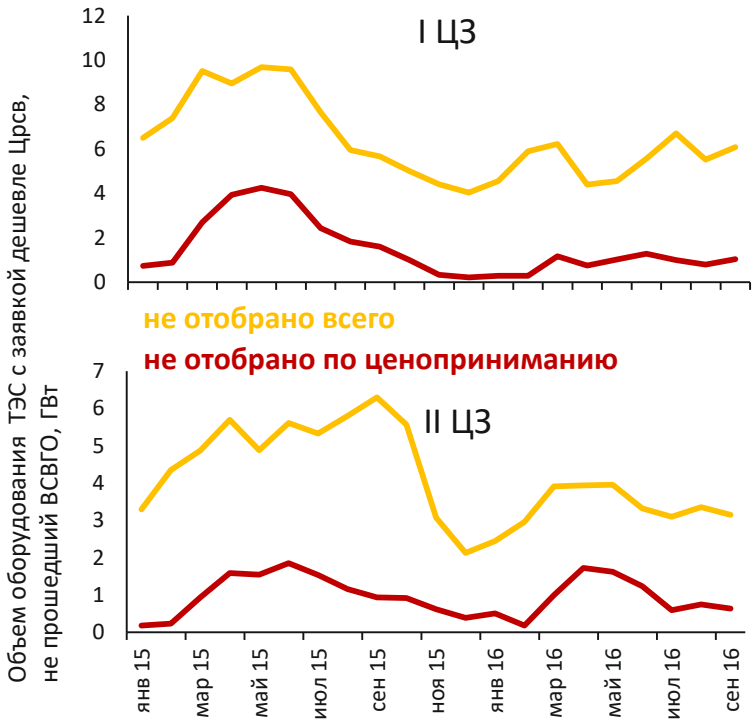
	Ген 1	Ген 2	Ген 3
Pmin	100	100	100
Pmax	150	150	150
Затраты	900	1200	1500

При спросе 200÷250 МВт отбираются по ВСВГО Ген1 и Ген2, формируется цена РСВ на уровне 900 руб/МВтч, что ниже затрат Ген2



- Данная проблема актуальна для отбираемых по итогам ВСВГО почти 3 ГВт генерации в I ЦЗ и около 200 МВт генерации во II ЦЗ
- Эти станции, подавая в ВСВГО заявки с ценой более 2000 руб/МВтч, проходят отбор, даже не будучи режимными

Проблемы сегодняшней модели: не отбираются в полном объеме ценопринимающие заявки



- Формально, включение оборудования, в отношении которого были поданы ценопринимающие заявки, не может вести к росту целевой функции ВСВГО
  - Поэтому все оборудование, по которому было подано ценопринимание, должно быть отобрано
- На практике, полностью ценопринимающие заявки делают решение задачи ВСВГО неустойчивым (целевая функция не зависит от того, включено такое оборудование или нет)
  - Это приводило бы к постоянным перепускам ценопринимающего оборудования
  - Для избежания таких перепусков ценопринимающая заявка моделируется заявкой с малой (около 1 руб/МВтч) ценой
  - При этом целевая функция становится чувствительной к объему ценопринимающего оборудования
  - Поэтому не все ценопринимающие заявки отбираются в ВСВГО

Насколько эти отклонения от эффективных моделей делают рынок неэффективным?

- Отмеченные в действующей на российском рынке процедуре ВСВГО потенциальные источники неэффективности привели к постановке вопросов о совершенствовании этой процедуры
  - Участниками Оптового рынка были внесены предложения по изменению регламентов рынка
  - При этом позиции потребителей и поставщиков в отношении предлагаемых изменений были противоположны

- С целями оценки влияния на эффективность рынка, а также прочих возможных последствий (в первую очередь, влияния на цену РСВ), было предложено провести модельные расчеты

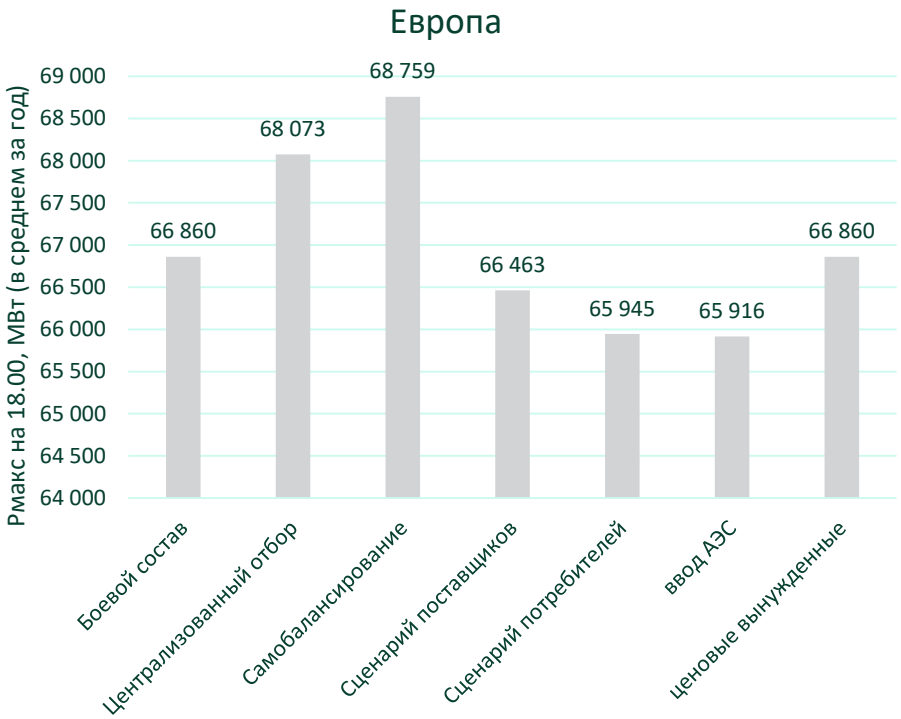
Процедура модельных расчетов

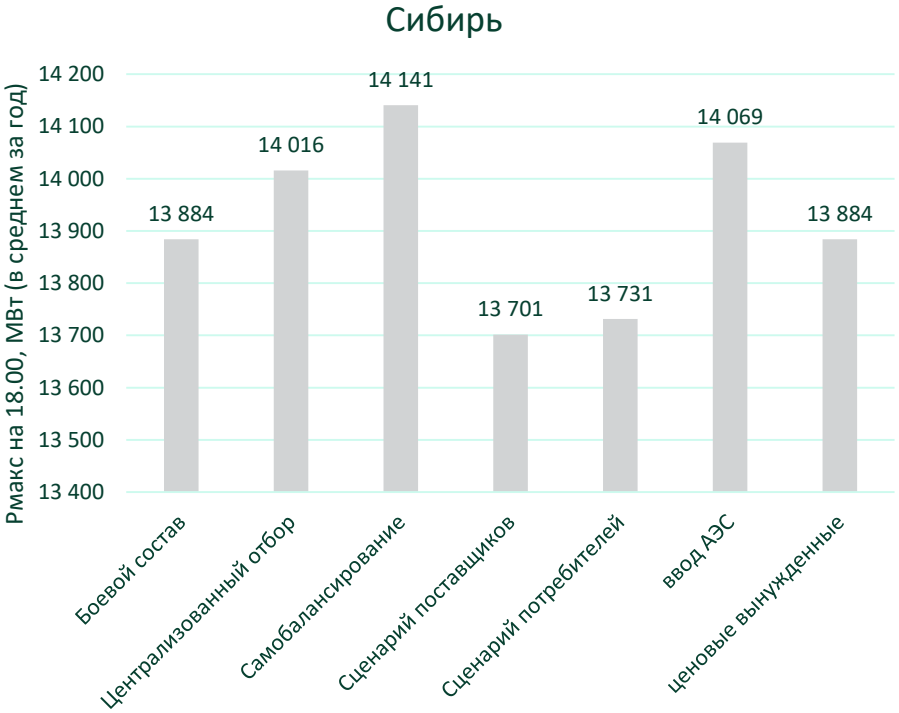
- Выбор типовых дней: минимальное отклонение внешних параметров (спрос, выработка ГЭС, АЭС и вынужденных, объем холодного резерва ТЭС) от средних значений за период. В результате выбраны:
  - зимние типовые дни – 1 февраля 2017 г, 13 декабря 2017 г, 14 февраля 2018 г (веса в годовом усреднении по 7/36)
  - летний типовой день – 18 июля 2017 г (вес в годовом усреднении 1/6)
  - типовой день «паводок» - 31.05.2017 г (вес в годовом усреднении 1/12)
  - типовой день «межсезонье» - 04.10.2017 г (вес в годовом усреднении 1/6)
- Используемая расчетная модель: фактическая расчетная модель на типовой день, включая
  - поузловое потребление
  - перечень и характеристики ветвей
  - выработка ГЭС и АЭС
  - выбор вынужденных и режимных генераторов
  - ограничения на перетоки по контролируемым сечениям
  - объем резервов
- Проведение оптимизационных расчетов состава оборудования и планирования производства:
  1. Подготовка модельных заявок ТЭС в соответствии с модельными топливными затратами
  2. Проведение ВСВГО в подходе самобалансирования и в подходе централизованного отбора
  3. Расчет РСВ (плановые цены и объемы) на отобранном составе оборудования
- Расчет показателей рынка
  - Объем отобранного оборудования
  - Цена РСВ
  - Себестоимость выработки электроэнергии. Равна произведению модельной топливной составляющей и объема производства; во всех сценариях включает затраты холостого хода
  - Маржинальный доход поставщиков. Равен разности между ценой РСВ в ГТП станции и модельной топливной составляющей станции, умноженной на объем производства
- «Точкой отсчета» для оценки результатов являются показатели, полученные в расчете РСВ на боевом составе оборудования с модельными заявками РСВ

Дополнительные модельные расчеты

- В целях оценки влияния вынесенных на рассмотрение НС предложений изменений регламентов, были проведены также следующие расчеты:
  - действующая модель отбора ВСВГО с устранением 1, 5 Руст
    - «Сценарий поставщиков» – предполагается, что те поставщики, которые сегодня подают ценопринимание в ВСВГО, перейдут к подаче заявок с ценой 500 руб/МВтч. Эта же цена будет транслирована ими в заявки РСВ
    - «Сценарий потребителей» - предполагается, что поставщики, с целью избежать убытков в РСВ, станут подавать в ВСВГО заявки с ценой, равной топливной себестоимости производства
    - «Ценовая заявка по вынужденным» – предполагается, что в отношении оборудования, включенного как вынужденное, поставщики подают ценовые (не ценопринимающие) заявки
    - ввод АЭС – действующий предполагается ввод 1 блока АЭС 1000 МВт на Нововоронежской АЭС-2 и замена 1 блока на Ленинградской АЭС
- Также в целях оценки увеличения числа пусков оборудования при переходе на единую торговую сессию с однодневным горизонтом планирования ВСВГО, проведен расчет состава оборудования при однодневном планировании

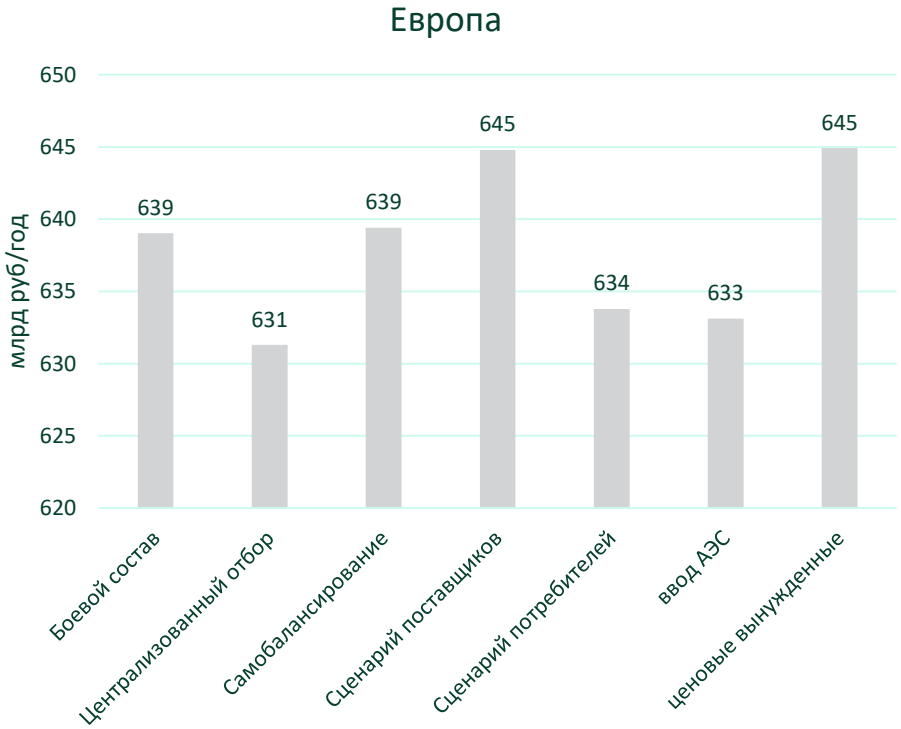
Результаты модельных расчетов: объем отобранного оборудования ТЭС

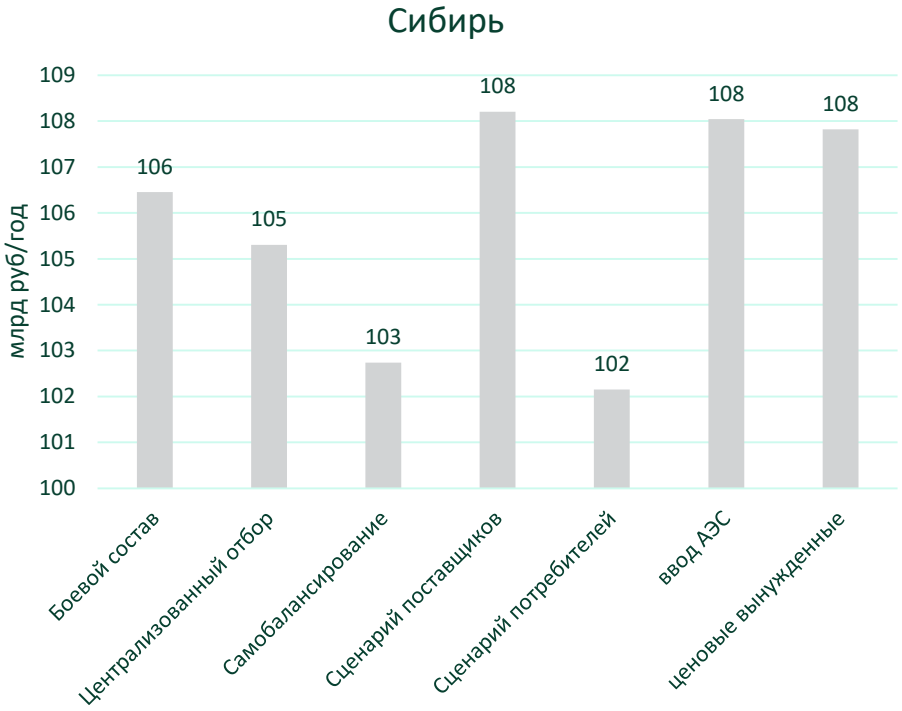




- Как в подходе централизованного отбора, так и в подходе самобалансирования объем включенного генерирующего оборудования увеличивается по сравнению с составом, отобранным согласно действующему порядку ВСВГО (боевым составом)
- В сценариях поставщиков и потребителей объем отбираемого оборудования снижается по сравнению с боевым составом

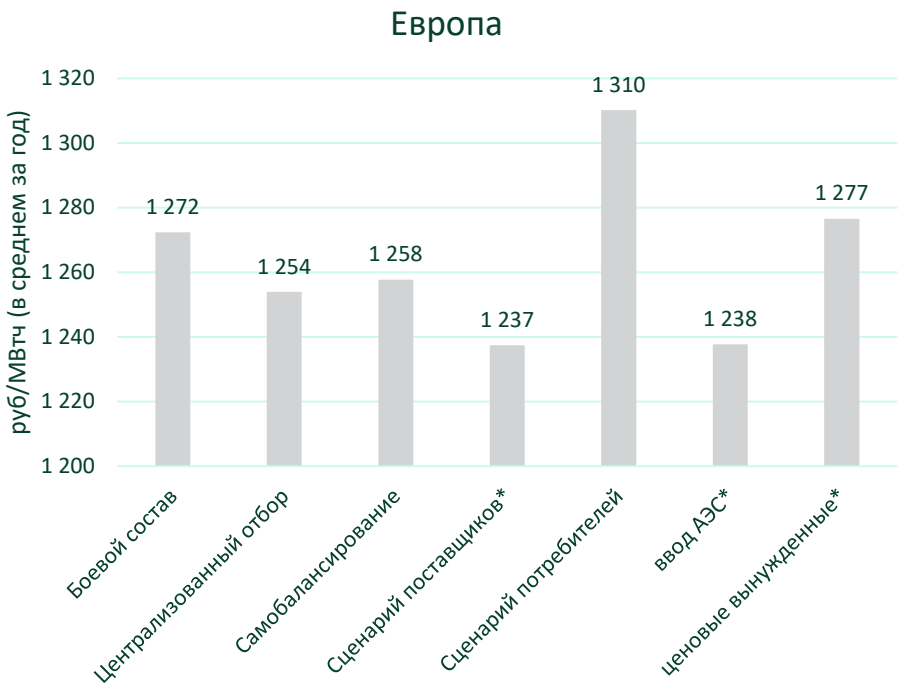
Результаты модельных расчетов: себестоимость производства ТЭС

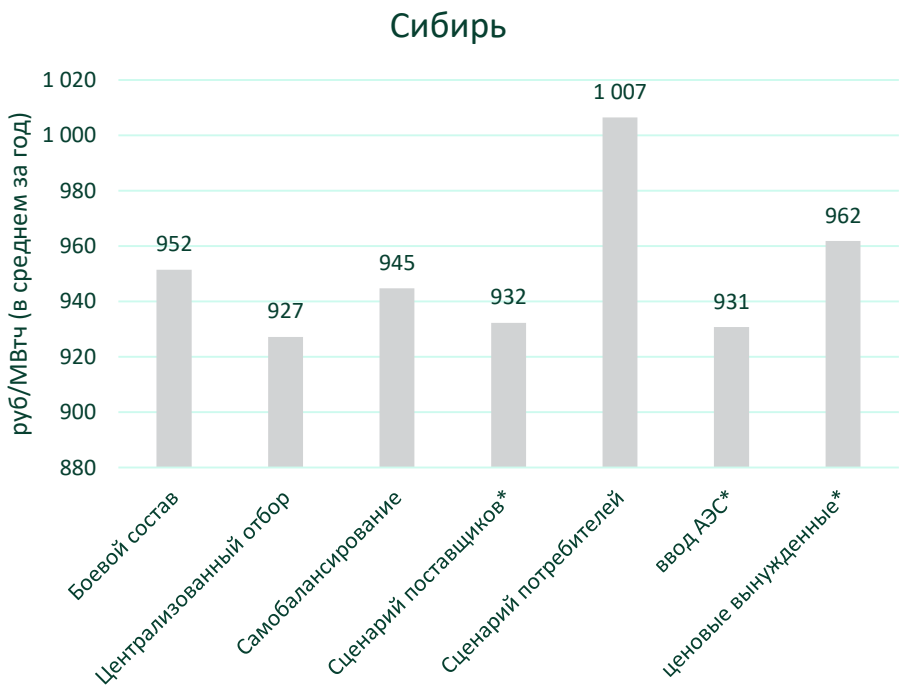




- Себестоимость производства характеризует его эффективность
- Наиболее низкая себестоимость достигается при централизованном отборе под спрос и в «сценарии потребителей»
- Причиной высокой себестоимости в сценарии поставщиков и ценовых вынужденных является то, что оптимизация РСВ происходила по фактическим заявкам, в то время как для оценки затрат использовались модельные заявки

Результаты модельных расчетов: Цена РСВ





- В подходах централизованного отбора, самобалансирования, а также в сценарии поставщиков цена РСВ снижается по сравнению с ценой для состава, отобранного согласно действующему порядку ВСВГО (боевого состава)
- В сценарии потребителей и ценовых вынужденных цена РСВ растет по сравнению с ценой для боевого состава

* Поскольку в сценариях поставщиков, ввода АЭС и ценовых вынужденных расчет РСВ производится на фактических заявках, а не модельных, Црсв пересчитывается с учетом изменения между боевым составом с модельными заявками и боевым составом с фактическими заявками:

Црсв’ = Црсв – Црсв(боевой состав, боевой РСВ) + Црсв(боевой состав, модельный РСВ)

Результаты модельных расчетов: ВСВГО на одни сутки

Дата	01.02.2017		31.05.2017		18.07.2017		04.10.2017	
	блоков	МВт	блоков	МВт	блоков	МВт	блоков	МВт
Включено относительно боевого состава	4	490	2	300	9	430	2	180
Выключено относительно боевого состава	1	65	2	330	2	280	9	1080

- Сравнивались составы оборудования, отобранного при проведении расчета ВСВГО на 3 дня вперед (действующая модель) и на 1 день вперед
  - расчет на 1 день вперед моделировался путем проведения расчета на действующей модели с выбором режимных условий (прогноз потребления, состояние и характеристики ветвей, набор сечений и ограничения на перетокам по ним) во второй и третий дни расчета такими же, как для первого дня
- Существенных различий в составах оборудования при проведении расчетов на 1 и на 3 дня не обнаружено

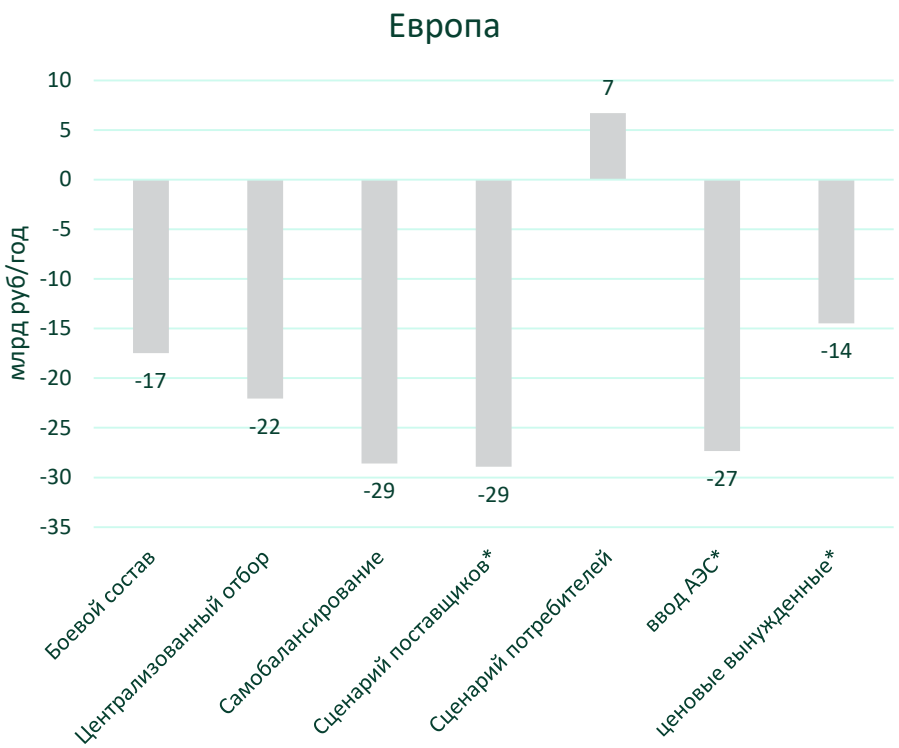
Результаты модельных расчетов: выводы

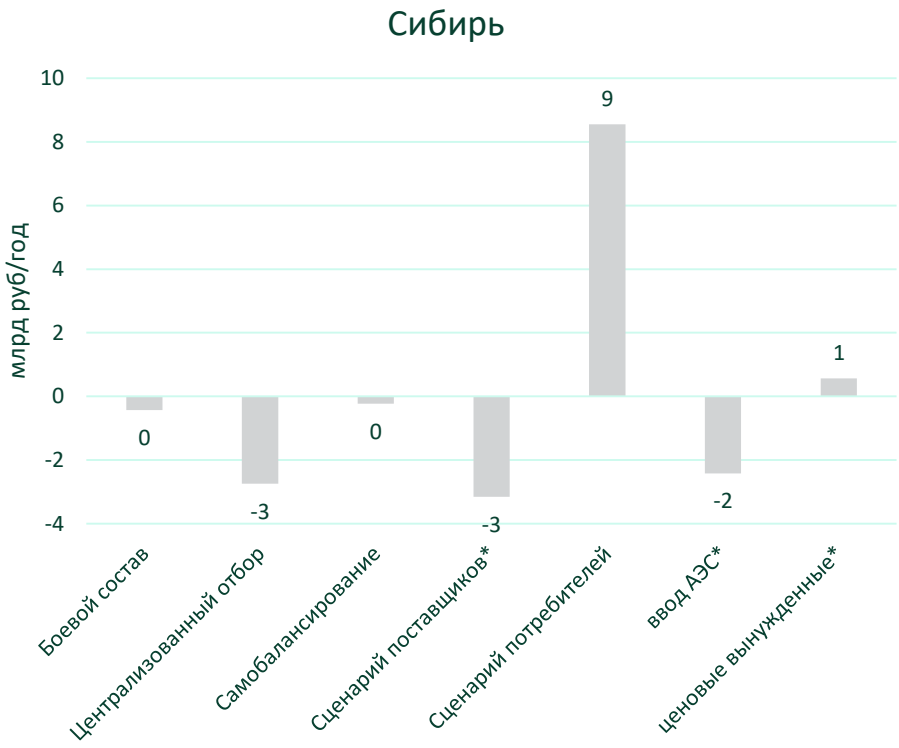
- В модели централизованного отбора себестоимость производства на ТЭС снижается на 1,2% относительно действующего порядка. При этом цена РСВ в среднем по году снижается на 1,7%, маржинальный доход ТЭС снижается на 8 млрд руб/год, убытки убыточных ТЭС возрастают на 2 млрд руб/год.
- В модели самобалансирования себестоимость производства на ТЭС снижается на 0,45% относительно действующего порядка. При этом цена РСВ в среднем по году снижается на 1,1%, маржинальный доход ТЭС снижается на 12 млрд руб/год, убытки убыточных ТЭС не изменяются.
- В случае реализации правок, направленных на решение вопроса «1,5 Руст» при сохранении в целом действующего порядка ВСВГО (отбор под Рмакс), результат зависит от предположений о влиянии данных правок на поведение поставщиков
  - Если поставщики, подающие сегодня ценопринимающие заявки в ВСВГО, станут вместо них подавать в ВСВГО и РСВ заявки с ценой 500 руб/МВтч (сценарий поставщиков), цены в I ценовой зоне снизятся на 2,8%, а во II ценовой зоне на 0,7%
  - Если поставщики перейдут на подачу в ВСВГО и РСВ заявок с ценой на уровне топливной составляющей себестоимости, цены в I ценовой зоне повысятся на 3%, а во II ценовой зоне – на 5,8%
- Отличие заявок в РСВ от затрат на производство может оказывать не менее существенное влияние на эффективность рынка, чем выбор модели ВСВГО. Так, в проводившемся в «сценарии поставщиков» расчете РСВ, исходя из фактических заявок, оценка исходя из модельных затрат показывает прирост себестоимости производства на 1%, что сравнимо со снижением себестоимости производства при переходе от действующего порядка ВСВГО к централизованному отбору и к самобалансированию
- В сценарии ввода АЭС цена РСВ снижается на 2,3% в I ценовой зоне и на 1,7% во II ценовой зоне
- Для рабочих дней, переход от 3-х дневного к 1-дневному горизонту планирования в ВСВГО не приводит к заметным изменениям в выборе состава оборудования. Влияние горизонта планирования на выбор состава оборудования в периоде, включающем как рабочие дни, так и выходные, требует дополнительного исследования

ПРИЛОЖЕНИЕ

Результаты расчетов маржинального дохода

Результаты модельных расчетов: маржинальный доход ТЭС



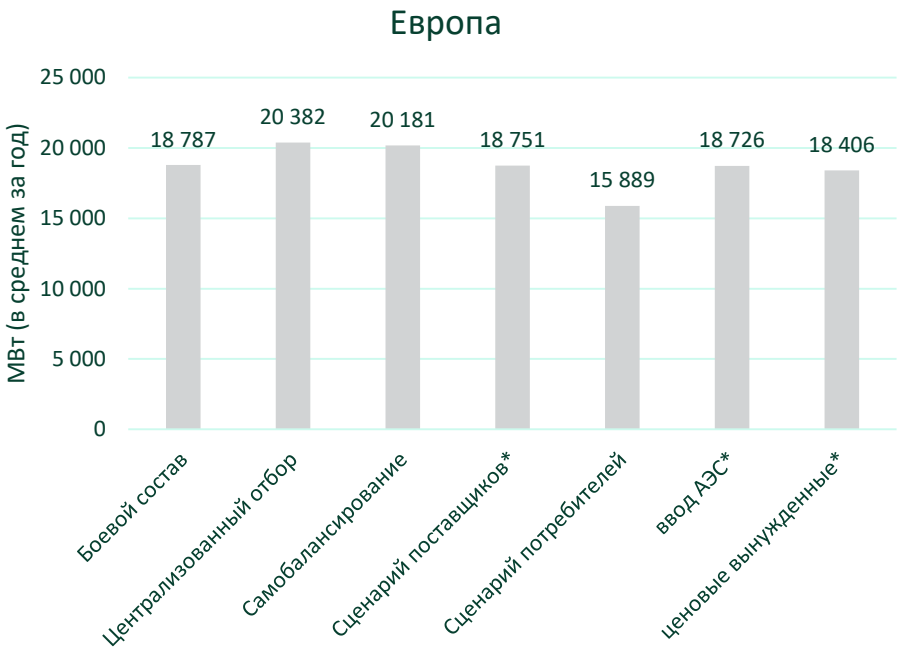


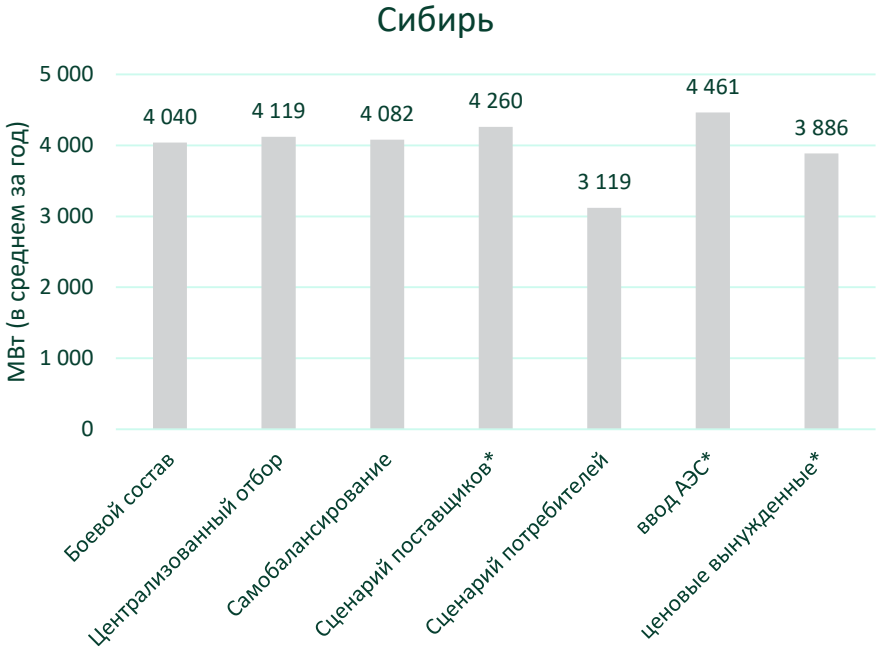
- Во всех сценариях, кроме сценария потребителей, маржинальный доход поставщиков снижается

* Поскольку в сценариях поставщиков, ввода АЭС и ценовых вынужденных расчет РСВ производится на фактических заявках, а не модельных, маржинальный доход (МД) пересчитывается с учетом изменения цены РСВ:

МД’ = МД – МД(боевой состав, боевой РСВ) + МД(боевой состав, модельный РСВ)

Результаты модельных расчетов: объем убыточных ТЭС (кроме вынужденных)



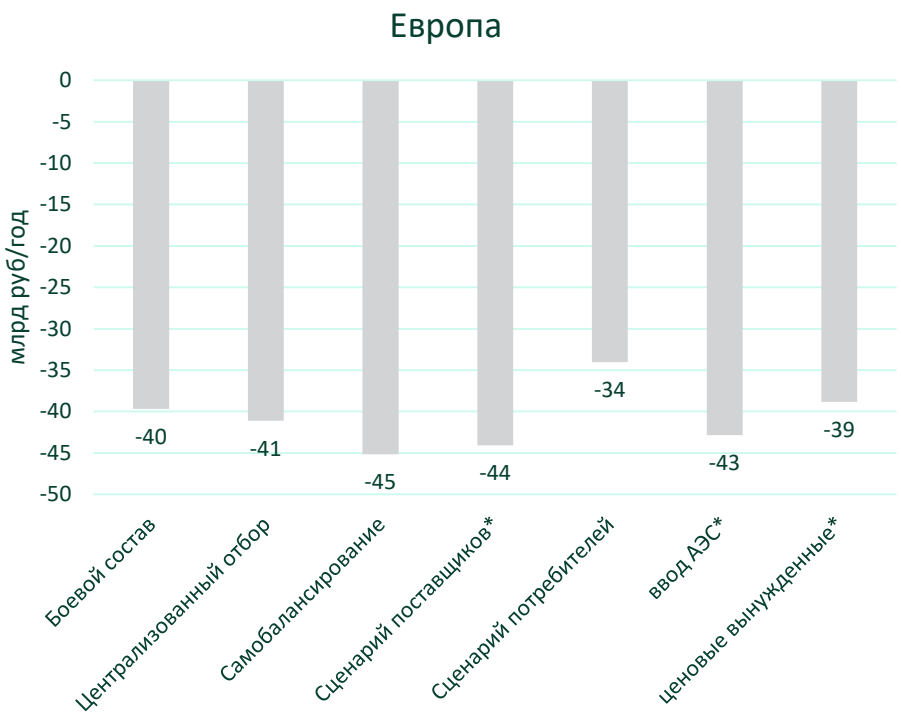


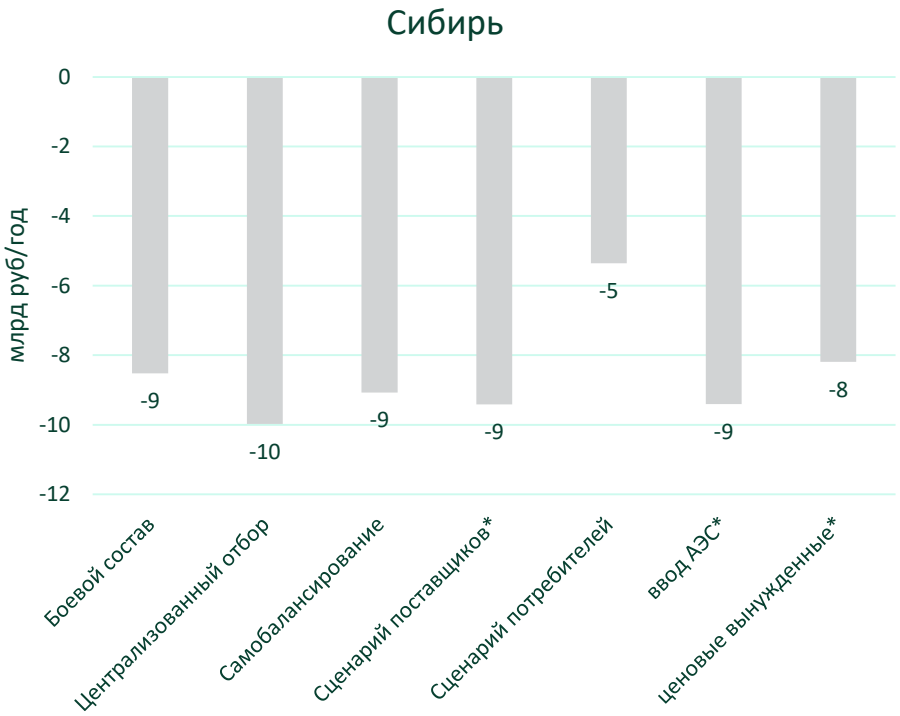
- В подходах централизованного отбора и самобалансирования, а также при вводе АЭС объем убыточного оборудования растет относительно боевого состава
- В сценарии поставщиков объем убыточного оборудования практически не изменяется относительно боевого состава
- В сценариях потребителей и ценовых вынужденных объем убыточного оборудования снижается

* Поскольку в сценариях поставщиков, ввода АЭС и ценовых вынужденных расчет РСВ производится на фактических заявках, а не модельных, объем убыточного оборудования (Рмакс) пересчитывается с учетом изменения цены РСВ между боевым составом с модельными заявками и боевым составом с фактическими заявками:

Рмакс’ = Рмакс – Рмакс(боевой состав, боевой РСВ) + Рмакс(боевой состав, модельный РСВ)

Результаты модельных расчетов: убыток ТЭС (кроме вынужденных)



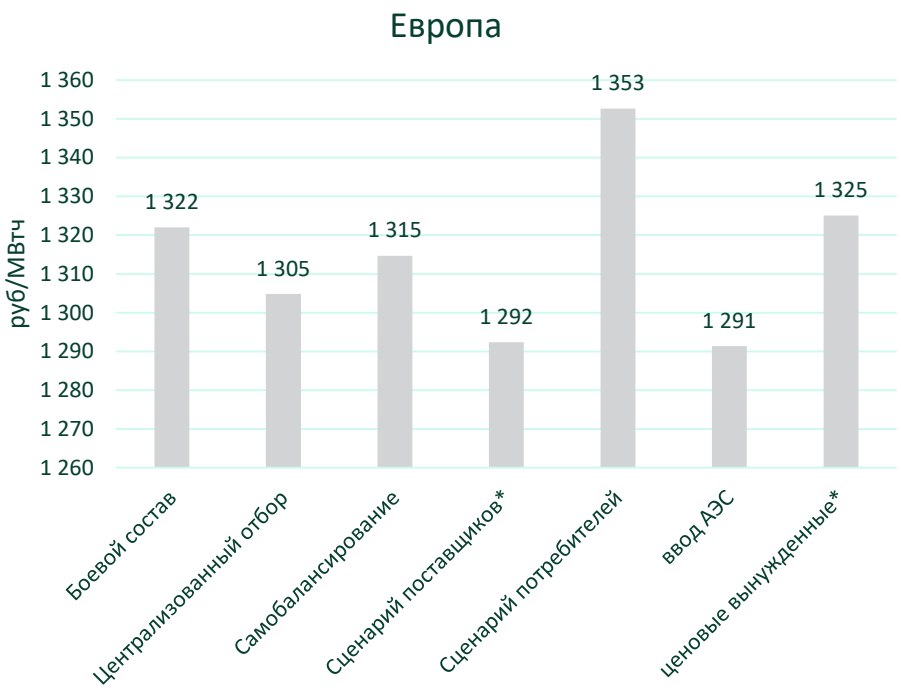


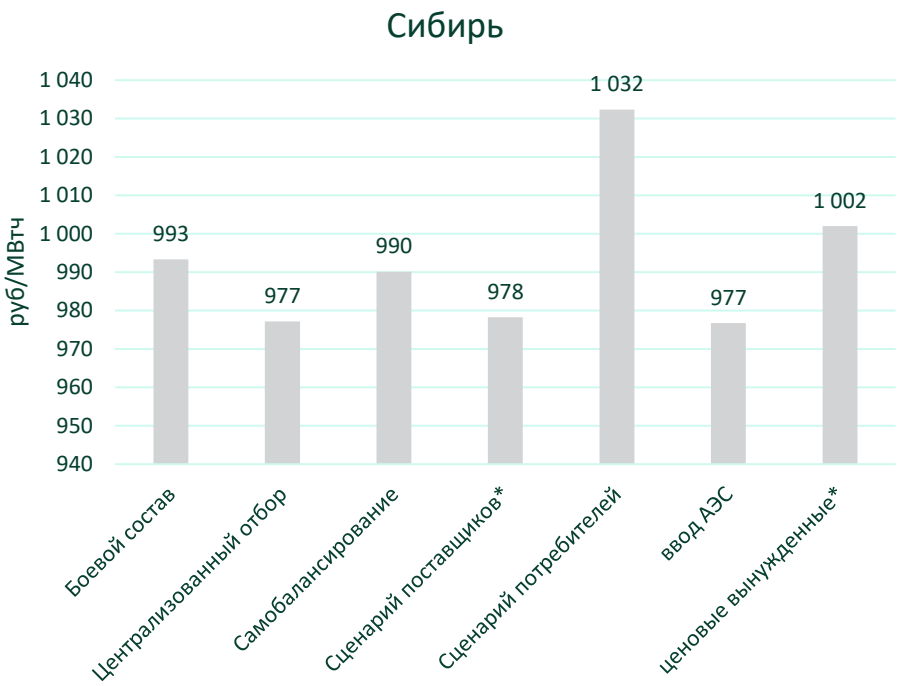
- Убыток убыточных ТЭС растет во всех сценариях, кроме сценария потребителей и ценовых вынужденных

* Поскольку в сценариях поставщиков, ввода АЭС и ценовых вынужденных расчет РСВ производится на фактических заявках, а не модельных, маржинальный доход (МД) пересчитывается с учетом изменения цены РСВ:

МД’ = МД – МД(боевой состав, боевой РСВ) + МД(боевой состав, модельный РСВ)

Результаты модельных расчетов: Црсв с учетом компенсации убыточным ТЭС





- В данном расчете цена РСВ корректируется с учетом доплаты потребителями станциям, несущим убытки в РСВ, не имеющим статуса вынужденных
- За исключением сценария потребителей и ценовых вынужденных, цена РСВ с учетом доплат снижается

* Поскольку в сценариях поставщиков, ввода АЭС и ценовых вынужденных расчет РСВ производится на фактических заявках, а не модельных, Црсв пересчитывается с учетом изменения между боевым составом с модельными заявками и боевым составом с фактическими заявками:

Црсв’ = Црсв – Црсв(боевой состав, боевой РСВ) + Црсв(боевой состав, модельный РСВ)