# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «БЭСТ-ПЕРСПЕКТИВА» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЛАНСОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЕЭС РОССИИ

АВТОРЫ:

ЛЕЛЮХИН Н.В.,
К.Т.Н.
ЗАО «АПБЭ»

БЕСЯДОВСКИЙ Е.Е.
ЗАО «АПБЭ»

СЮТКИНА Т.Б.
ЗАО «АПБЭ»

АБАКШИН П.С.,
К.Т.Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

АЛЯБЫШЕВА Т.М.,
К.Т.Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ПРОТОПОПОВА Т.Н.,
К.Т.Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ЕГОРОВ М.В.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ЮРКИН А.Г.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**С 2005 г. в закрытом акционерном обществе «Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике» (АПБЭ) активно и успешно внедряются разработки открытого акционерного общества «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (НТЦ ФСК ЕЭС) в области оптимизации режимов работы электростанций ЕЭС России. Результатом совместной работы ЗАО «АПБЭ» и ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» явился усовершенствованный программный комплекс моделирования перспективных балансов электроэнергии и оценки их стоимости (ПК «БЭСТ-Перспектива»). Данный комплекс предназначен для выполнения вариантных расчетов оптимальных почасовых электроэнергетических режимов, балансов мощности и электроэнергии и резервов мощности энергообъединений и территорий энергосистем. Комплекс позволяет также выполнять проверку допустимости по режимным ограничениям прогнозных балансов мощности и электроэнергии и планов развития генерирующих мощностей и электрических сетей на долгосрочную перспективу (от одного года и более).**

Блок экономического анализа в составе ПК «БЭСТ-Перспектива» предназначен для расчета цен оптового рынка электроэнергии, расчетов и анализа годовых изменений этих цен, часовых и среднесуточных колебаний цен. Эта особенность программного комплекса позволяет оценивать влияние принимаемых решений на цены оптового рынка электроэнергии при анализе планов социально-экономического развития Российской Федерации и при оценке схем и программ модернизации энергетики.

В настоящее время с помощью ПК «БЭСТ-Перспектива» в ЗАО «АПБЭ» выполняются расчеты баланса электроэнергии на предстоящий год (при анализе материалов сводного прогнозного баланса производства и поставок электроэнергии) или сезон (при анализе балансов электроэнергии на предстоящий осенне-зимний период). Программный комплекс способен производить расчеты на неограниченный период прогнозирования, поэтому «БЭСТ-Перспектива» применяется также и для целей формирования и анализа среднесрочных и перспективных балансов электроэнергии. В частности, в ЗАО «АПБЭ» проводится экономический анализ последствий реализации программы развития ЕЭС России. В рамках этой работы были выполнены расчеты перспективных энергетических балансов ЕЭС России на период до семи лет. Расчеты предназначены для количественной оценки различных вариантов использования существующего и вновь вводимого генерирующего и сетевого оборудования и определения варианта наиболее эффективного использования этого оборудования. Оценка проводится с учетом допустимости и экономической целесообразности предлагаемого режима загрузки генерирующего оборудования. Учитывается также влияние предлагаемых вводов на стоимость поставляемой на оптовом рынке электроэнергии. В настоящей статье речь пойдет о применении ПК «БЭСТ-Перспектива» для расчета перспективных энергетических балансов ЕЭС России и их экономической оценки на период с 2012 по 2018 г. Статья является продолжением темы, начатой в публикации [1].

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ

Расчет и экономическая оценка перспективных энергетических балансов мощности и энергии выполнялись на период 2012–2018 гг. в соответствии со Схемой и программой развития Единой энергетической системы России на 2012–2018 гг. [2] (далее Схема и Программа). При моделировании энергетических режимов учитывались:

- региональная структура перспективных балансов электроэнергии с учетом вводов с высокой вероятностью реализации на период 2012–2018 гг.;
- объем и структура вводов, модернизации, демонтажа, перемаркировки и реконструкции генерирующих объектов и генерирующего оборудования по ОЭС и ЕЭС России на 2012–2018 гг.;
- вводы электросетевых объектов напряжением 220 кВ и выше в 2012–2018 гг.

Формирование исходных данных выполнялось программными средствами комплекса «БЭСТ-

ИНФОРМАЦИЯ

### ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ЕЭС РОССИИ

Схема и программа развития ЕЭС России – технический план развития ЕЭС, который ежегодно разрабатывается и утверждается на семилетний период.

На ее основе разрабатываются инвестиционные программы субъектов электроэнергетики, определяется спрос на мощность для конкурентного отбора мощности.

Документ включает в себя прогноз спроса на электрическую энергию по территориям субъектов Российской Федерации, а также содержит прогноз требуемого увеличения мощностей для удовлетворения спроса на электрическую энергию, учитывающий:

- прогнозируемые максимумы нагрузки потребителей;
- сальдо экспорта (импорта) мощности;
- нормативный резерв мощности;
- ограничения установленной мощности электростанций;
- мероприятия по вводу, демонтажу, модернизации и реконструкции действующего генерирующего оборудования.

## ДИАЛОГОВАЯ ПАНЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПК «БЭСТ-ПЕРСПЕКТИВА»

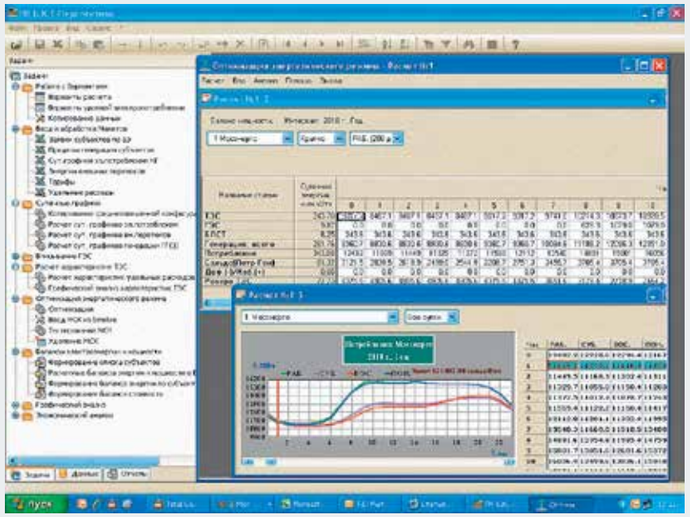

Рис. 1

Перспектива» для заданных Схемой и Программой вариантов прогнозных условий:

- уровней или объемов электропотребления;
- объемов экспортно-импортных перетоков мощности;
- планов вводов, перемаркировки и демонтажа генерирующего оборудования электростанций;
- условий обеспеченности водными ресурсами ГЭС;
- топологии сети и пропускной способности контролируемых сечений.

При этом учитывались также рассчитанные в ЗАО «АПБЭ» удельные расходы топлива по группам генерирующего оборудования электростанций и прогнозная стоимость по видам топлива (уголь, мазут, газ).

## РАСЧЕТНЫЙ ПЕРИОД

В программном комплексе «БЭСТ-Перспектива» расчетный период – год – задается интервалами (месяцами). В свою очередь, каждый интервал (месяц, квартал) может быть представлен типовыми характерными сутками (понедельник, рабочий день, суббота, воскресенье) при задании соответствующего количества этих суток в каждом интервале. Следует отметить, что помесячный расчет по характерным суткам при разработке прогнозного баланса на период десять и более лет является чрезмерно трудоемким и затратным по времени процессом. Поэтому было принято решение расчетный период (год) представлять в виде четырех среднегодовых характерных суток для формирования прогнозного баланса на перспективу. Это позволяет существенно сократить время, необходимое для подготовки исходных данных, и обеспечить своевременность расчетов.

Сопоставительные расчеты показали, что принятый подход не оказывает существенного влияния на распределение выработки электроэнергии между электростанциями при прогнозировании перспективных балансов электроэнергии.

## РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

Расчет потокораспределения по контролируемым сечениям выполняется по эквивалентной модели сети, учитывающей параметры реальной электрической схемы. Для этого применялась технология, основанная на построении матрицы сетевых коэффициентов (МСК). Линейные коэффициенты МСК определяют взаимные соответствия между параметрами электрической схемы (узлы и ветви) и параметрами эквивалентной модели сети (объекты нагрузок и генерации, контролируемые сечения линий). В общем случае, расчеты МСК выполнялись для каждого анализируемого года с учетом прогноза изменения топологии схемы электрических соединений, обусловленных вводом новых линий электропередачи и новых объектов генерации.

## СОСТАВЛЯЮЩИЕ БАЛАНСА МОЩНОСТИ ЕЭС РОССИИ

Исходные данные для выполнения расчетов перспективных энергетических режимов по характерным суткам формируются следующим образом:

- графики электропотребления, экспортных и импортных перетоков строились по заданным годовым объемам электропотребления и в соответствии со статистическими зависимостями, описывающими их конфигурацию;
- графики нагрузки ГЭС рассчитывались по годовой выработке ГЭС рабочей мощности и учитывающей заданные изменения установленной мощности ГЭС;
- графики нагрузки АЭС – графиком, полученным на основе заданной годовой выработки электроэнергии и рабочей мощности с учетом прогнозируемых изменений установленной мощности АЭС;
- графики мелких электростанций, включая электростанции, работающие по теплофикационному циклу, учитывались заданными фиксированными графиками.



## ДИАЛОГОВАЯ ПАНЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ БЛОКОМ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

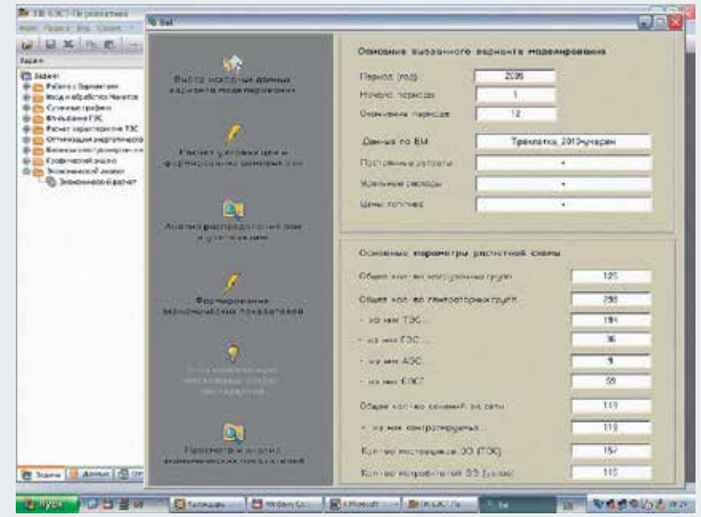

Рис. 2

## ГЕНЕРИРУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения расчетов на перспективный период необходимы данные о рабочей мощности генерирующего оборудования по всем объектам генерации, ввиду неопределенности, с учетом изменений, обусловленных объемом и структурой вводов, модерниза-

## ВАРИАНТ ПРОГНОЗНОГО БАЛАНСА МОЩНОСТИ ОЭС СИБИРИ

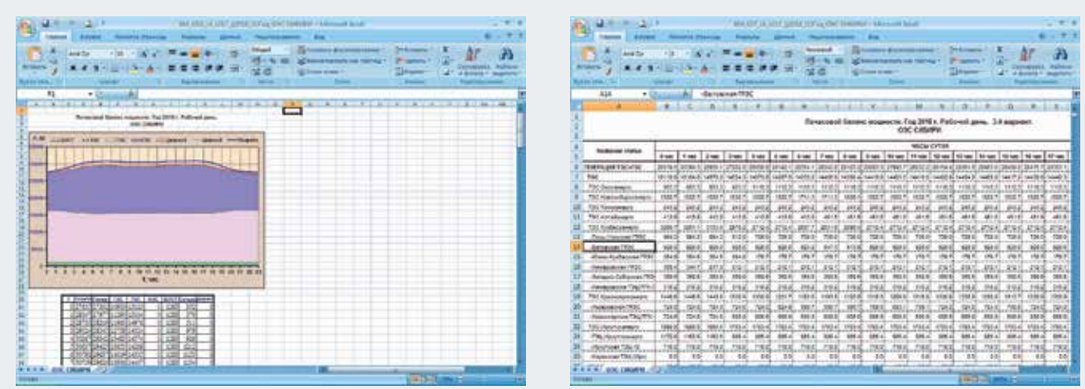

Рис. 3

## ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БАЛАНСА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЕЭС РОССИИ БЕЗ ОЭС ВОСТОКА (ПЕРВАЯ И ВТОРАЯ ЦЕНОВЫЕ ЗОНЫ)

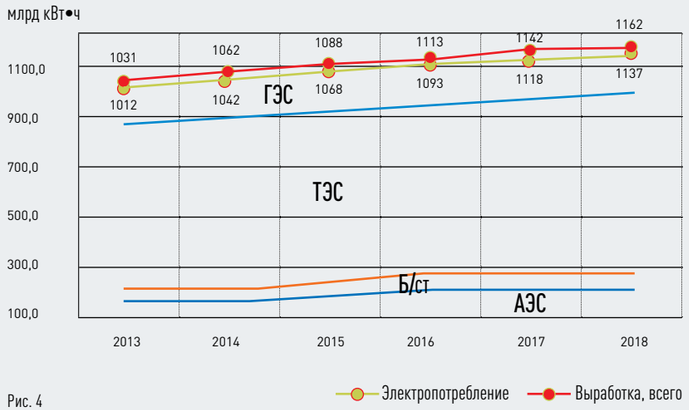


Рис. 4

ции, демонтажа, перемаркировки и реконструкции генерирующего оборудования. Значения рабочей мощности каждой электростанции были приняты в соответствии с балансом мощности, утвержденным Федеральной службой по тарифам на 2012 г. Кроме того, были учтены изменения, обусловленные вводом, модернизацией, демонтажом, перемаркировкой и реконструкцией генерирующего оборудования в 2012–2018 гг. Такой подход обусловлен неопределенностью ремонтной программы на указанный период.

## ГРАФИКИ МАРЖИНАЛЬНЫХ ЦЕН ПО ЭНЕРГОЗОНАМ И ПО ХАРАКТЕРНЫМ СУТКАМ

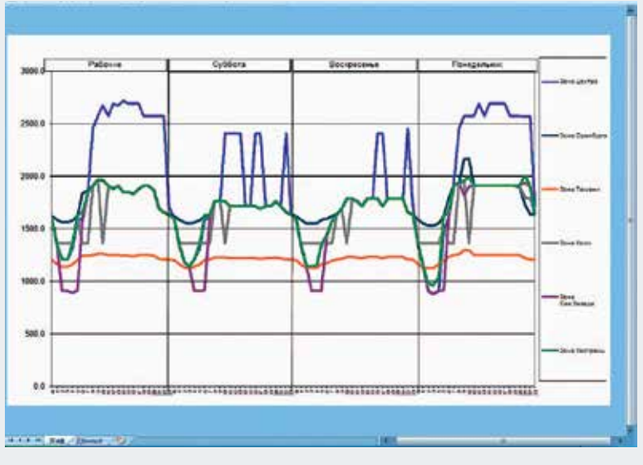

Рис. 5

## РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО (ДОПУСТИМОГО) БАЛАНСА МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Расчет распределения производства электроэнергии между тепловыми электростанциями ЕЭС России выполняется по замыкающему принципу. Сначала в графике нагрузки учитывается выработка электроэнергии электростанциями, работающими по известному графику нагрузок: атомными электростанциями, мелкими тепловыми электростанциями и ТЭС, работающими по теплофикационному графику нагрузки. Затем в график электропотребления вписывается выработка ГЭС. Оставшаяся часть графика (за вычетом учтенной нагрузки упомянутых ТЭС, АЭС и ГЭС) покрывается производством электроэнергии тепловыми электростанциями.

Распределение производства электроэнергии между тепловыми электростанциями осуществляется в соответствии с критерием минимизации стоимости затрат на генерацию электроэнергии с учетом следующих режимных ограничений:

- по балансу мощности;
- по допустимому диапазону изменения рабочих мощностей;
- по пропускной способности линий электропередачи в контролируемых сечениях;
- с учетом интегральных ограничений, обусловленных графиком поставки топлива.



## ИЗМЕНЕНИЕ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЦЕНОВЫХ ЗОНАХ ОПТОВОГО РЫНКА, О.Е. К ЦЕНЕ 2012 Г.

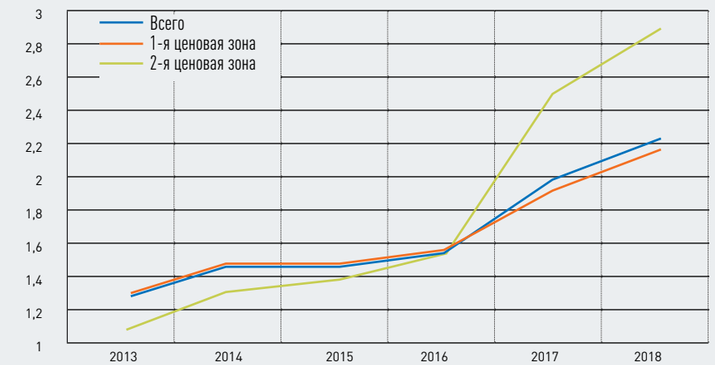


Рис. 6

Для расчета оптимального распределения нагрузок для каждой расчетной станции предварительно выполняется определение стоимостных характеристик станций на основе удельных и прогнозных цен на топливо. В стоимостных характеристиках тепловых электростанций смоделирован также переход с основного вида топлива на резервный.

В случае получения несбалансированного энергетического режима комплекс «БЭСТ-Перспектива» позволяет найти сбалансированный режим с помощью целенаправленных вариаций составляющих статей баланса мощности.

Анализ результатов расчета выполнялся на основе выходных форм (в графическом и табличном исполнении) баланса мощности и энергии по характерным суткам года для энергосистем, ОЭС, ЕЭС. На рис. 3 приведен типичный результат расчета баланса мощности ОЭС, на рис. 4 приведена динамика изменения отдельных показателей баланса электроэнергии за анализируемый период.

## МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

Основным назначением программной модели является стоимостная оценка прогнозных балансов мощности ЕЭС. Анализ эффективности полученных прогнозных балансов мощности выполнялся по маржинальным ценам потребителей и объектов генерации (предельным затратам), которые определяются в программном комплексе «БЭСТ-Перспектива» с помощью функции Лагранжа, соответствующей оптимальному распределению загрузки генерирующего оборудования энергообъединения. Компьютерная модель способна выполнять следующие функции:

- формирование территориальных энергозон свободных перетоков и списка контролируемых сечений, определяющих эти энергозоны;
- анализ изменения маржинальных цен потребителей и производителей по часам типовых суток;
- формирование списка ценообразующих электростанций;
- определение средневзвешенных оптовых цен электроэнергии на заданный период времени для отдельных нагрузочных групп и энергозон;
- анализ финансовых результатов работы электростанций.

## ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗОН СВОБОДНЫХ ПЕРЕТОКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СПИСКА КОНТРОЛИРУЕМЫХ СЕЧЕНИЙ

Экономический анализ перспективных энергетических режимов выполнялся с учетом того, что в настоящее время на оптовом рынке электроэнергии существуют две

## ВВОД МОЩНОСТЕЙ В ПЕРВОЙ ЦЕНОВОЙ ЗОНЕ

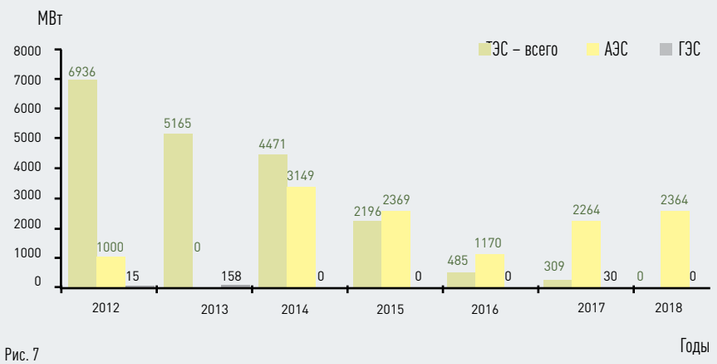


Рис. 7

независимые торговые площадки – ценовые зоны оптового рынка электроэнергии европейской части и оптового рынка Сибири. Обе площадки были смоделированы программными средствами «БЭСТ-Перспектива». Моделирование ценовых зон выполнялось с учетом ограничений по пропускной способности контролируемых сечений. Наличие предельных загрузок в таких зонах порождает кластеризацию сети на отдельные сегменты, или энергозоны свободных перетоков электроэнергии, с разными маржинальными (предельными) затратами на производство электроэнергии. Последнее означает появление дифференцирования затрат по энергозонам. На рис. 5 показан пример расчетных графиков прогнозируемых маржинальных цен по энергозонам и по характерным суткам для одного года.

По результатам расчета формировался список активных контролируемых сечений, предельные загрузки которых формируют эти энергозоны, и список ценообразующих электростанций, т. е. электростанций, замыкающих баланс мощности данной энергозоны и тем самым формирующих маржинальную цену зоны. Для каждой станции вычислялось количество часов месяца и года, для которых данная электростанция является ценообразующей.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫХ ЦЕН ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Расчет стоимости потребления электроэнергии выполнялся по объектам электропотребления, нагрузочным группам, ОЭС и ЕЭС с учетом расчетных энергозон и условий оптового рынка. На рис. 6 показан типичный результат этих расчетов, выполненный для двух ценовых зон и для оптового рынка электроэнергии в целом с учетом прогнозируемой динамики ее изменения по годам с 2013 по 2018 г. Поскольку в ПК «БЭСТ-Перспектива» стоимость электроэнергии рассчитывается без учета нормы рентабельности электростанций, стоимости мощности и влияния балансирующего сектора оптового рынка электроэнергии, то эта стоимость в абсолютном выражении не может считаться точным прогнозом. Фактически эта оценка является отражением прогнозной стоимости топлива, используемого на ТЭС, и изменения структуры генерирующих мощностей и топологии сети. Поэтому стоимость электроэнергии в ценовых зонах на указанных графиках приведена в относительных единицах к стоимости электроэнергии в 2012 г.

На рис. 7 и 8 показаны графики ввода генерирующего оборудования в первой и второй ценовых зонах. Из этих графиков видно, что ввод в эксплуатацию Богучанской ГЭС в 2012 и 2013 гг., выход ее на проектные параметры и ввод высокоэкономичной тепловой генерации в ОЭС Сибири в 2014 г. будут способствовать замедлению роста стоимости электроэнергии во второй ценовой зоне в 2015 и 2016 гг. Последующий рост стоимости в этой ценовой зоне связан с ростом электропотребления и привлечением для его покрытия более дорогой электроэнергии угольных ТЭС ОЭС Сибири. В то же время ввод новых блоков на атомных электростанциях в первой ценовой зоне способствует замедлению роста цены до 2016 г. включительно. Снижение вводов АЭС в 2017 г. и одновременный демонтаж устаревшего оборудования АЭС приведут к росту стоимости электроэнергии в первой ценовой зоне, а дальнейший ввод с 2017 г. энергоблоков Балтийской АЭС замедляет рост стоимости электроэнергии в первой ценовой зоне.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТАНЦИЙ

Эффективность работы электростанции в общем случае определяется доходами станции, которые формируются по маржинальным ценам



## ВВОД МОЩНОСТЕЙ ВО ВТОРОЙ ЦЕНОВОЙ ЗОНЕ

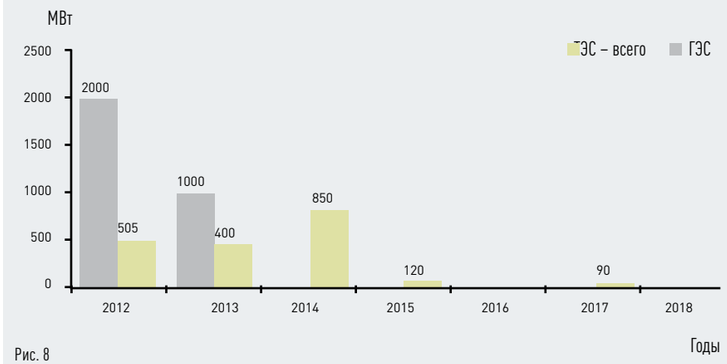


Рис. 8

энергозоны и затратам станции на производство энергии (топливным затратам).

Для оценки эффективности работы станции выполняется расчет стоимостных прогнозных показателей, в том числе: маржинального дохода станций; топливных затрат станций, прибыли (убытков) станции, прогнозных удельных затрат топлива на производство электроэнергии.

## ВЫВОДЫ

Опыт применения ПК «БЭСТ-Перспектива» в ЗАО «АПБЭ» позволяет сделать вывод, что разработанное программное обеспечение может применяться для расчета и анализа перспективных балансов энергии ЕЭС России. ПК «БЭСТ-Перспектива» позволяет:

- моделировать условия функционирования рынка электроэнергии, учитывающие изменения установленной мощности, структуры генерирующего оборудования и изменения топологии электрической сети;
- оперативно выполнять подготовку и контроль достоверности информации на сколь угодно длительный период прогнозирования;
- выполнять настройку и проведение вариантных расчетов прогнозных энергетических режимов и их экономическую оценку;
- формировать различные выходные отчеты, необходимые для анализа результатов расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абакшин П. С., Протопопова Т. Н., Егоров М. В., Жернов А. А., Волков И. В. Планирования электроэнергетических режимов, балансов мощности и электроэнергии на долгосрочную перспективу // Энергия единой сети, 2012, № 5.
2. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2012–2018 годы. Утверждена приказом Минэнерго России от 13 августа 2012 года. http://www.minenergo.gov.ru/

ИНФОРМАЦИЯ

## ПК «БЭСТ - ПЕРСПЕКТИВА»

Это усовершенствованный программный комплекс моделирования перспективных балансов электроэнергии и оценки их стоимости. Данный комплекс предназначен для выполнения вариантных расчетов оптимальных почасовых электроэнергетических режимов, балансов мощности и электроэнергии и резервов мощности энергообъединений и территорий энергосистем. Комплекс позволяет также выполнять проверку допустимости по режимным ограничениям прогнозных балансов мощности и электроэнергии и планов развития генерирующих мощностей и электрических сетей на долгосрочную перспективу (от одного года и более). Блок экономического анализа в составе ПК «БЭСТ-Перспектива» предназначен для расчета цен оптового рынка электроэнергии, расчетов и анализа годовых изменений этих цен, часовых и среднесуточных колебаний цен. Эта особенность ПК позволяет оценивать влияние принимаемых решений на цены оптового рынка электроэнергии при анализе планов социально-экономического развития РФ и при оценке схем и программ модернизации энергетики.