

## МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА РАСПОЛАГАЕМОЙ МОЩНОСТИ ГЭС С УЧЕТОМ ЕЕ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Будылин М.А.<sup>1</sup>, Соколов С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31 E-mail: [budylin.ma@yandex.ru](mailto:budylin.ma@yandex.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9. E-mail: [serge-falcon@mail.ru](mailto:serge-falcon@mail.ru)

Электроэнергетика является одной из базовых отраслей народного хозяйства. Прогнозирование потребления электроэнергии, планирование объемов и структура генерирующих мощностей являются приоритетными для развития всех отраслей промышленности, включая как традиционные, так и высокотехнологичные производства. Реформы электроэнергетической отрасли, проводимые во многих странах, включая Россию, привели к созданию оптового рынка электроэнергии (мощности). Обеспечение удовлетворения средне- и долгосрочного спроса на оптовом рынке осуществляется с помощью различных механизмов регулирования со стороны государственных органов и инфраструктурных организаций. В зависимости от используемых механизмов регулирования генерирующие компании могут определять оптимальную стратегию планирования своих производственных мощностей. В статье описываются существующие условия и ограничения определения фактического объема поставки мощности на оптовый рынок. Анализируются недостатки применяемых в России методик планирования располагаемой мощности для гидроэлектростанций при подаче заявки на конкурентный отбор мощности. Обосновано рассмотрение располагаемой мощности в виде равномерно распределенной случайной величины. Рассмотрены существующие статистические подходы к анализу различных «игр с природой», в которых один игрок – человек действует осознанно, а другой – «природа» случайным образом. Авторы предлагают математическую модель определения ожидаемого дохода при подаче заявки на конкурентный отбор мощности с учетом равномерного случайного распределения располагаемой мощности. Определен оптимальный план с точки зрения максимизации ожидаемого дохода и вычислено значение ожидаемой прибыли. Авторы доказали, что если за недопоставку мощности действует штраф в размере 5%, то оптимальный план приближается к значению наибольшего объема располагаемой мощности.

Ключевые слова: оптовый рынок электроэнергии и мощности, конкурентный отбор мощности, гидроэлектростанции, модель определения оптимального плана, равномерное распределение располагаемой мощности

## MODEL FOR DETERMINATION OF THE OPTIMAL PLAN OF THE AVAILABLE CAPACITY OF THE HPPs WITH ITS UNIFORM DISTRIBUTION

Budylin M.A.<sup>1</sup>, Sokolov S.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev 31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” pr., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation, E-mail: [budylin.ma@yandex.ru](mailto:budylin.ma@yandex.ru)

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University 7-9 Universitetskaya nab., Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation. E-mail: [serge-falcon@mail.ru](mailto:serge-falcon@mail.ru)

Electricity is one of the basic sectors of the national economy. Forecasting electricity consumption, the planning and structure of generating capacities is a priority for the development of all industries, including both traditional and high-tech production. Reform of the electricity sector, conducted in many countries, including Russia, has led to the creation of the wholesale market of electricity (capacity). Providing satisfaction to the medium - and long-term demand on the wholesale market by using different mechanisms of regulation by governmental agencies and infrastructure organizations. Depending on the regulatory mechanisms of the generating company the optimal strategy of planning their production capacities can be determined. The authors describe the existing conditions and constraints by determination the actual scope of capacity supply to the wholesale market. The shortcomings of the used in Russia scheduling techniques of the available capacity for hydroelectric power plants are analyzed when applying for competitive capacity selection. The article establishes a review of available capacity as a uniformly distributed random variable. Statistic approaches to the analysis of different “Nature games” having one player – a man moving intentionally and another – the nature without any strategic interest are described. The authors propose a mathematical model for the expected income determining when apply for competitive capacity selection regarding a uniformly distributed random variable of available capacity. Optimal solution considering maximization of the income expected is introduced. Expected profit is

**calculated. The authors proved that in case the capacity's underdelivery is punished with a fine of 5 per cent, the optimal solution approaches the value of the maximum volume of the available power.**

Keywords: wholesale electricity and capacity market, competitive capacity selection, hydroelectric power plants, model for determination the optimal plan, uniform distribution of the available capacity.

В современном мире электроэнергетика является основой развития всех отраслей промышленности. Проблемы развития электроэнергетики – обеспечение удовлетворения спроса в средне- и долгосрочной перспективах, размещение и структура генерирующих мощностей, определение плановых объемов поставки, справедливой оплаты за электроэнергию и мощность, проведение конкурентных отборов электроэнергии и мощности, привлечение инвестиций в отрасль, разработка модели оптового рынка электроэнергии и мощности – широко обсуждаются в международном академическом сообществе. Рыночные реформы в электроэнергетике в конце 20го начале 21го века привели к созданию национальных оптовых рынков электроэнергии, а в отдельных странах (США, Россия) также и оптовых рынков мощности. Совершенствование работы оптовых рынков мощности в России и США, их регулирование являются важными темами для осуществления государственного планирования и деятельности организаций коммерческой и технологической инфраструктуры отрасли [2,9].

В соответствии с Федеральным законом «Об электроэнергетике» №35-ФЗ, Правилами оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), а также отдельными Регламентами ОРЭМ, являющимися приложениями к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка, который обязаны подписать все участники оптового рынка, на ОРЭМ торгуется как отдельный товар мощность – обязательство поставщиков поддерживать в готовности генерирующее оборудование, способное на выдачу мощности оговоренного объема и качества [4,7].

До начала реформы электроэнергетики в России планирование объема располагаемой мощности генерирующими компаниями фактически не осуществлялось. Переход от одноставочного тарифа на электроэнергию к двуставочному на электроэнергию и мощность, запуск оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), начало проведения процедуры конкурентного отбора мощности (КОМ) привели к необходимости планирования этого показателя.

Годовое планирование объема располагаемой мощности в настоящее время осуществляется для двух независимых друг от друга направлений:

- для формирования Сводного прогнозного баланса поставок электрической энергии и мощности, определения объемов поставки по регулируемым договорам и установления тарифов в соответствии с методикой Федеральной службы по тарифам (ФСТ России) [3];

- для целей покрытия максимально возможного спроса на мощность в рамках проводимой организацией технологической инфраструктуры ОРЭМ (ОАО «СО ЕЭС») процедуры конкурентного отбора ценовых заявок поставщиков на продажу мощности (КОМ) [4].

При этом возможность продажи мощности, а также объемы поставки, определяются именно в рамках КОМ. Данная процедура проводится ежегодно на следующий календарный год (год вперед), начиная с июля 2008 года. Несмотря на то, что в будущем планируется проводить отбор на 4 календарных года вперед, как это предусмотрено Правилами ОРЭМ, реализация этого механизма в силу ряда причин каждый год сдвигается. По итогам КОМ для каждого месяца определяется объем поставки мощности для каждой генерирующей единицы мощности (ГЕМ) электростанции, а также цена КОМ, которая является общей для всех поставщиков на оптовом рынке [4]. В общем случае объем фактической поставки мощности определяется как минимальное значение из объема мощности, отобранного по результатам КОМ ( $N_{КОМ}$ ) и установленной мощности ( $N_{УМ}$ ) за вычетом объема недопоставки мощности ( $N_{нед}$ ) и собственного потребления ( $N_{СП}$ ) по формуле [5].

$$N = \min(N_{КОМ}; N_{УМ} - N_{нед} - N_{СП})$$

Исходя из вышеприведенной формулы, принимая во внимание, что величины установленной мощности и собственного потребления мощности являются относительно постоянными, основным фактором, снижающим поставку мощности, является объем недопоставки мощности и его главная составляющая – объем недопоставки мощности, определяемый способностью к выработке электроэнергии генерирующего оборудования участника ОРЭМ в расчетном месяце. Этот показатель определяется как сумма произведения штрафных коэффициентов и сумм невыполнения требований по поставке мощности. Объемы невыполнения требований по поставке мощности классифицируются на 2 основных вида:

- снижение мощности, связанное с наличием зарегистрированных ограничений установленной мощности (например, для ТЭС влияние может оказывать температурный фактор, качество топлива, для ГЭС – фактор водности);
- снижение мощности, связанное с неготовностью генерирующего оборудования (превышение планового объема ремонтов, необходимость внепланового ремонта).

Тогда как второй вид невыполнения требований по поставке мощности связан с состоянием оборудования, первый вид вызван отличием объема фактической располагаемой мощности от объема установленной мощности  $N_{КОМ}$ . При этом, если объем фактических ограничений превышает плановые (указанные при подаче заявки на КОМ), то поставщик в соответствии с пп. 2 п. 54 Правил ОРЭМ обязан уплатить штраф в размере 5% от разницы

плановой и фактической располагаемой мощности  $5\% \times (N_{\text{КОМ}} - N_{\text{факт}})$ . С другой стороны, поставщик в соответствии с формулой поставки мощности не может реализовать объем поставки мощности выше отобранного на КОМ [5]. Таким образом, для генерирующей компании важной задачей является подача заявки на КОМ, максимизирующей объем поставки мощности на оптовый рынок в результате минимизации отличия плановых объемов располагаемой мощности от фактических.

Особое место в электроэнергетике России занимают гидроэлектростанции, реализующие на оптовом рынке как базовые продукты – электроэнергию и мощность, так и услуги по обеспечению системной надежности. Из всех существующих типов электростанций именно ГЭС являются наиболее маневренными, способными при необходимости быстро существенно увеличить объемы выработки, покрывая пиковые нагрузки энергосистемы. Поэтому планированию производственной программы и регулированию работы ГЭС на оптовом рынке придается важное значение.

Гидроэлектростанции, несмотря на наличие ряда ограничений, связанных с процедурой КОМ (особый порядок расчета объема для подачи заявки на КОМ в отношении декабря – месяца, в соответствии с которым определяется цена КОМ, а также обязательное ценопринимание на весь заявленный объем), планирование объемов располагаемой мощности для подачи на КОМ в отношении января-ноября, а также суточное планирование, осуществляют самостоятельно [4].

Одной из возможностей планирования располагаемой мощности является использование среднесезонных значений за последние 25 лет либо с учетом периода нормальной эксплуатации, как это предусмотрено в методике ФСТ России, используемой для определения тарифов на электроэнергию и мощность, а также объемов поставок по регулируемым договорам [3].

В то время как для планирования объемов выработки указанная методика допустима, то планирование объемов располагаемой мощности на основе среднесезонных значений в случае многолетних лет приводит к невозможности продажи на ОРЭМ объемов превышения и, как следствие, к упущенной выручке.

Существующие методики определения фактической располагаемой мощности гидроэлектростанций [1], так же как и методика ФСТ России, не позволяют учесть экономические ограничения, заложенные в действующей в России модели оптового рынка электроэнергии и мощности.

Рассмотрим математическую модель определения оптимального плана с учетом равномерного распределения располагаемой мощности. Данная модель является одним из видов «игр с природой», в которых один игрок – человек действует осознанно, а другой –

«природа» случайным образом. Для случаев дискретного распределения известно несколько способов выбора стратегии: критерий Вальда, критерий Гурвица, критерий Сэвиджа [6]. Также существуют методы, реализующие анализ рисков для принятия решений в условиях неопределенности с помощью метода Монте-Карло, с помощью построения нейронных сетей и другие [8].

Для построения оптимального плана воспользуемся правилом максимизации ожидаемого дохода для непрерывного случая [10]. Так как цена конкурентного отбора является постоянной величиной, максимизация ожидаемого дохода достигается путем максимизации объема поставляемой на оптовый рынок мощности.

Пусть  $N_{\min}$  – наименьший объем располагаемой мощности за период наблюдения, МВт, а  $N_{\max}$  – наибольший объем располагаемой мощности, МВт. Обозначим  $N_{\text{КОМ}}$ , МВт объем мощности, подаваемый в заявке на КОМ.

Предположим, что объем фактической располагаемой мощности  $N$  равномерно случайно распределен от  $N_{\min}$  до  $N_{\max}$ . В частности, данное допущение применимо для одной из гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада в соответствии со статистикой 25 лет.

Плотность распределения располагаемой мощности  $f(N)$  имеет вид

$$f(N) = \begin{cases} 0, & N < N_{\min}, \\ \frac{1}{N_{\max} - N_{\min}}, & N_{\min} \leq N \leq N_{\max}, \\ 0, & N > N_{\max}. \end{cases}$$

Если  $N_{\text{КОМ}} \leq N$  (объем фактической располагаемой мощности больше, чем объем плановой располагаемой мощности, указанной в заявке на КОМ), тогда объем поставки мощности на оптовый рынок (без учета снижения по неготовности и собственного потребления) составит  $N_{\text{КОМ}}$  МВт.

Если  $N_{\text{КОМ}} > N$  (объем фактической располагаемой мощности меньше, чем объем плановой располагаемой мощности, указанной в заявке на КОМ), тогда объем поставки мощности на оптовый рынок (без учета снижения по неготовности и собственного потребления) составит  $N - 0,05(N_{\text{КОМ}} - N)$  МВт (удалось продать только  $N$ , кроме того, накладывается штраф в размере 5%).

Построим функцию прибыли  $Z$ , зависящую от случайной величины  $N$

$$Z(N_{\text{КОМ}}, N) = \begin{cases} N - 0,05(N_{\text{КОМ}} - N), & N_{\text{КОМ}} > N, \\ N_{\text{КОМ}}, & N_{\text{КОМ}} \leq N. \end{cases}$$

Вычислим теперь математическое ожидание прибыли  $MZ$ :

$$\begin{aligned} MZ(N_{\text{КОМ}}) &= \int_{-\infty}^{+\infty} Z(N_{\text{КОМ}}, N) f(N) dN. \\ MZ(N_{\text{КОМ}}) &= \frac{1}{N_{\max} - N_{\min}} \left( \int_{N_{\min}}^{N_{\text{КОМ}}} N - 0,05(N_{\text{КОМ}} - N) dN + \int_{N_{\text{КОМ}}}^{N_{\max}} N_{\text{КОМ}} dN \right) = \\ &= \frac{1}{N_{\max} - N_{\min}} \left( -0,525 N_{\text{КОМ}}^2 + N_{\text{КОМ}} (N_{\max} + 0,05 N_{\min}) - 0,525 N_{\min}^2 \right) \end{aligned}$$

Проанализируем полученное выражение. Нетрудно доказать, что  $MZ(N_{\text{КОМ}})$  достигает своего максимума при

$$N^* = \frac{N_{\text{max}} + 0,05N_{\text{min}}}{1,05} \approx 0,95N_{\text{max}} + 0,05N_{\text{min}}.$$

Математическое ожидание прибыли составит

$$MZ(N^*) = \frac{1}{N_{\text{max}} - N_{\text{min}}} \left( \frac{(N_{\text{max}} + 0,05N_{\text{min}})^2}{2,1} - 0,525N_{\text{min}}^2 \right).$$

## Заключение

На основе предлагаемой методики подачи заявки на конкурентной отбор мощности можно сделать следующие выводы:

- учет существующих экономических ограничений приводит к изменению модели планирования располагаемой мощности в отношении гидроэлектростанций;
- при действующих величинах штрафов оптимальным решением для гидроэлектростанций является подача заявки на КОМ, близкой к максимальной располагаемой мощности для соответствующего месяца (за исключением декабря).

Для дальнейшего изучения представляют интерес следующие аспекты:

- анализ чувствительности оптимального плана от размера штрафов за расхождение объема фактической располагаемой мощности от плановой;
- изменение модели определения оптимальной заявки для подачи на конкурентный отбор мощности с учетом нормального распределения располагаемой мощности;
- доработка модели в случае расчета тарифов и объемов поставки по регулируемым договорам на основе отобранной заявки гидроэлектростанции на конкурентный отбор мощности, а не по действующей методике ФСТ (как среднемноголетнее значение за 25 лет);
- включение в модель дополнительных факторов, которые могут повлиять на финансовый результат гидроэлектростанций от работы на рынке мощности (доля либерализации рынка мощности, наличие компенсационных соглашений).

## Список литературы

1. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водно-энергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
2. Невмержицкая Н. Новая модель рынка электроэнергии и мощности – взгляд НП ГП и ЭСК // Энергорынок. 2013. №06 (111). С. 41-43.

3. Порядок формирования сводного прогнозного баланса производства и поставок электрической энергии (мощности) в рамках единой энергетической системы России по субъектам Российской Федерации, утв. Приказом ФСТ России от 12 апреля 2012 г. № 53-э/1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fstrf.ru/docs/electro/276> (дата обращения 10.11.2014).
4. Правила оптового рынка электрической энергии и мощности, утв. Постановлением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172.
5. Приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент определения объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm> (дата обращения 10.11.2014).
6. Протасов И.Д. Теория игр и исследование операций: учеб. пособие. М.: Гелиос АРВ, 2006. 368 с.
7. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (с изменениями и дополнениями).
8. Clemen R. and Reilly T. Making Hard Decisions with DecisionTools: An Introduction to Decision Analysis (3rd ed.). Stamford CT: Cengage. 2014. 816 p.
9. Crampton P., Ockenfels A., Stoft S. Capacity Market Fundamentals // IAEE Economics of Energy & Environmental Policy, 2013. Vol.2. No.2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iaee.org/en/publications/eeepjournal.aspx> (дата обращения 10.11.2014).
10. De Groot M.H. Optimal Statistical Decisions. Wiley Classics Library. 2004. 512 p.

**Рецензенты:**

Белякова Г.Я., д.э.н., профессор кафедры «Организация и управление наукоемкими производствами», Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск;

Владимирова О.Н., д.э.н., доцент кафедры «Экономики и финансового права» Российского государственного социального университета, филиал в г. Красноярске, г. Красноярск.