

УДК 620.9:001.891.57

**В.К. Ядыкин**

**ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**V.K. Iadykin**

**THE ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL  
OF ENERGY COMPLEX DEVELOPING**

Предложен подход к планированию долгосрочного развития энергетики «от предложения к спросу», основанный на поиске баланса интересов поставщика и потребителя энергоресурсов. Разработана экономико-математическая модель для нахождения оптимального плана технических решений с учетом баланса возможностей электроэнергетики и потребностей экономики в энергоресурсах. Актуальность рассмотрения в программах развития технических решений в энергетике обусловлена структурой себестоимости энергии, преобладающую долю в которой (60 %) занимают затраты на строительство электростанций.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОРЕСУРСЫ. РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА. ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. СТРУКТУРА СЕБЕСТОИМОСТИ ЭНЕРГИИ.

The article covers the approach to long-term planning for development of energy «from supply to demand», based on the search for balance of interests of energy resources suppliers and consumers. The author's economic-mathematical model allows to find the optimal plan of technical decisions on the basis of balance of power and opportunities for energy needs of the economy. It is proved that the relevance of the consideration in the development programs of technical solutions in the energy sector due to the structure of the cost of energy, in which the major share (60 %) belongs to the cost of building power plants.

ELECTRIC POWER INDUSTRY. ENERGETIC RESOURCES. DEVELOPMENT OF THE ENERGY COMPLEX. ECONOMIC-MATHEMATICAL MODELS. THE COST STRUCTURE OF THE ENERGY.

Формирование экономико-математической модели развития энергетического комплекса предполагает разработку программы развития энергетического комплекса и представляет собой сложный процесс долгосрочного планирования. Задача формирования оптимальной программы развития энергетического комплекса в Российской Федерации является актуальной, прежде всего, потому, что в целом ряде стран комплексное планирование энергетики – это регулярный процесс, основанный на непрерывном пересмотре расчетных величин в соответствии с фактическими данными об экономической ситуации в масштабах страны, региона.

Согласно комментарию С.А. Солженицина (McKinsy & Company) к исследованию «Электроэнергетика России 2030: Целевое видение» в рамках задачи развития энергетики актуальны следующие вопросы:

1) закреплен ли основной приоритет за объемом производства энергоресурсов или прежде всего важна эффективность выработки энергии;

2) насколько важен опережающий темп ввода генерирующих мощностей в электроэнергетике с учетом риска повышения тарифа в связи с появлением избытка мощностей;

3) каков прогноз стоимости топлива в долгосрочном плане развития [1, с. 68].

Интересно замечание С.А. Солженицина в отношении, казалось бы, не подлежащего сомнению тезиса о планировании энергетики по принципу «от спроса к предложению», т.е. в отношении того, что единственным фактором, определяющим развитие электроэнергетики, должен быть объем потребления электрической и тепловой энергии. Возможно, не следует пренебрегать подходом «от предложения к спросу». Действительно, заслуживает внимания оценка

соотношения возможностей электроэнергетики с ростом потребности в электроэнергии для последующего решения проблемы баланса спроса и предложения с обеих сторон. Дискуссионный характер тезиса «от спроса к предложению» подтверждается тем, что этот тезис предполагает стимулирование энергоемких и особенно электроемких отраслей, а также опережающие темпы строительства энергетических объектов, что само по себе не бесспорно. Исходя из этого, рассмотрим следующие альтернативные утверждения:

1) в настоящее время конкурентное преимущество российских производителей, т. е. потребителей энергоресурсов, по издержкам отсутствует, поэтому актуально повышение эффективности использования энергоресурсов;

2) эффективное потребление энергоресурсов должно определяться «ценовыми сигналами», показывающими возможность перехода в зону дефицита электроэнергии;

3) энергетическая политика на основе эффективности использования энергоресурсов позволит осуществить переход российской экономики к более низкому уровню потребления, что приведет к более низким капитальным затратам на строительство и ввод мощностей [1, с. 69].

Аргументом против рассмотрения подхода «от предложения к спросу» является ряд недостатков основанного на этом подходе механизма привлечения денежных средств за счет платы за подключение новых потребителей к энергосетям. Основным недостатком такого механизма стало отрицательное влияние на развитие экономики дополнительного сбора за активное развитие региональных субъектов, увеличивающих потребление энергоресурсов, что проявилось в фактической дискриминации наиболее активно развивающихся предприятий по сравнению со стагнирующими промышленными потребителями. Однако введение платы за подключение новых потребителей есть лишь следствие неправильного толкования подхода «от предложения к спросу» и не показатель того, что суть подхода является ошибочной [1, с. 70]. Заказ электроэнергетиками нового оборудования для обеспечения потребителя необходимым объемом электрической и тепловой энергии как следствие

подхода «от спроса к предложению» приведет к строительству мощностей «с запасом», что может вызвать, во-первых, повышение тарифа в годы ввода электростанций опережающими темпами, а во-вторых, отсутствие стимула в последующие годы к вводу более совершенной технологии выработки электроэнергии и теплоэнергии.

Актуальность теоретического обеспечения формирования оптимальной инвестиционной программы развития энергетического комплекса подтверждается преобладающей долей капитальных затрат на строительство электростанций и на закупку энергооборудования в структуре себестоимости выработки электроэнергии: 60 % в себестоимости занимают затраты на строительство электростанций; 30 % – затраты на топливо; 10 % – собственные затраты энергетиков [1, с. 71]. Заслуживает внимания тезис о целевом ориентире развития российской энергетики на основе технических решений, которые состоят в рациональном использовании энергоресурсов, снижении пиков потребления электроэнергии и сокращении стоимости строительства энергообъектов [1, с. 72].

Графики пиковых нагрузок потребления энергоресурсов потребителями наряду с нормативами качества энергоснабжения и степенью надежности работы энергосистемы должны быть учтены при составлении прогноза потребления энергоресурсов.

Для формирования программы развития энергетического комплекса необходимо рассмотреть весь набор возможных технических решений, которые можно реализовать на всех этапах технологической цепочки процесса «производство – транспортировка – потребление энергоресурсов», с учетом уже реализованных технических решений.

Обозначим множество всех возможных технических решений (мероприятий) на всех этапах технологического процесса (производство, транспортировка и потребление энергоресурсов) через  $J$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ), а  $j$ -е техническое решение программы развития энергетического комплекса – через  $x_j^k$ . Индекс  $j$  показывает номер мероприятия из всего набора возможных мероприятий  $J$ . Индекс  $k$  показывает, к какому виду

ресурсов относится мероприятие. При этом  $k = 1$  – для мероприятий по выработке электроэнергии,  $k = 2$  – для мероприятий по выработке тепловой энергии. Тогда набор технических решений программы развития энергетического комплекса  $X_j^k$  для мероприятий по ресурсу  $k$  включает:  $\{x_1^k, x_2^k, \dots, x_{j-2}^k, x_{j-1}^k, x_j^k, x_{j+1}^k, x_{j+2}^k, \dots, x_j^k\}$ . Переменная  $x_j^k$  из набора технических решений может принимать значения 0 или 1 в зависимости от того, реализуется мероприятие или нет (1, если мероприятие реализуется, и 0, если мероприятие отклонено).

Каждое техническое решение имеет свои признаки, которые можно разбить на следующие четыре группы.

1. Экономические признаки:

- объем капитальных затрат на реализацию технического решения  $K_j$  (тыс. руб.);
- срок службы технического решения до капитального ремонта  $T_j$  (год);
- стоимость эксплуатационных затрат в  $t$  год срока службы решения  $E_j^t$  (тыс. руб.);
- стоимость затрат на обслуживание долга, связанного с финансированием программы развития на всех этапах производственного цикла за  $T$  лет  $I_j$  (тыс. руб.).

2. Технологические признаки (они определяют способ производства электрической и тепловой энергии):

- ТЭЦ, ТЭС, использующие различные виды топлива (уголь, газ, мазут, атомную энергию и пр.);
- гидроэлектростанции;
- приливные электростанции;
- солнечные батареи;
- солнечные коллекторы;
- геотермальные станции;
- ветроэлектростанции;
- комбинированные способы производства энергии, использующие две и более технологии.

3. Признаки логистической связи производства энергии и ее потребления:

- схема централизованной выработки энергии;
- схема децентрализованной выработки энергии;
- схема комбинированной (часть централизованной, часть децентрализованной) выработки энергии;
- схема транспорта энергии от производителя к потребителю;

– схема накопления энергии.

4. Технические признаки:

- объем вырабатываемого ресурса в год  $W_j^k$ ;
- режимные карты выработки ресурса  $W_j^k(t)$ .

Исходными данными для формирования программы развития энергетического комплекса являются:

- данные о спросе на энергоресурсы на период реализации программы развития;
- источник энергии для производства ресурса в границах энергетического комплекса;
- экологические требования, ограничивающие применение технических решений и технологий.

Объем потребляемого ресурса по годам реализации программы обозначим  $W_g^k(t)$ . Объем спроса должен быть составлен с учетом долгосрочного прогноза потребления ресурсов. Для этого необходимо провести оценку покупательского спроса в зависимости от величины тарифа на энергоресурс  $p_t^k$ . Тариф следует устанавливать таким образом, чтобы стимулировать реализацию энергосберегающих мероприятий потребителя.

В детерминированном виде зависимость спроса потребителя  $g$  в  $t$ -й год на соответствующий ресурс  $k$  имеет вид:

$$W_g^k(t) = f_g(p_t^k).$$

Объем потребления ресурса по всем потребителям будет равен:

$$\sum_{g=1}^G W_g^k(t) = \sum_{g=1}^G f_g(p_t^k),$$

где  $G$  – количество потребителей ресурса в год ( $g = 1, 2, \dots, G$ ).

Глубина прогноза должна быть не менее максимального срока службы технического решения. При прогнозировании должны быть определены вероятности наступления того или иного сценария.

Обозначим сценарии динамики во времени спроса на ресурсы:  $\mu_1$  – оптимистичный,  $\mu_2$  – пессимистичный,  $\mu_3$  – наиболее вероятный. Количество разработанных сценариев изменения спроса во времени может быть более трех. Математическое ожидание объема потребления на

соответствующий вид ресурса для  $S$  сценариев будет равно:

$$M(W_g^k(t)) = \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^S \mu_s f_g(p_t^k),$$

где  $W_g^k(t)$  – объем потребления ресурса в  $t$ -й год потребителем  $g$ , ед. рес./год;  $\mu_s$  – вероятность реализации  $s$ -го сценария.

Каждый вариант набора технических решений программы развития энергетического комплекса определяется объемом вырабатываемого ресурса  $W_j^k$  по всему набору технических решений  $J$  в соответствии с графиком его потребления  $W_g^k(T)$ .

Обязательным условием реализуемости вариантов программ развития является превышение объема вырабатываемой энергии  $W_j^k$  над объемом потребляемой энергии  $W_g^k$  во всем диапазоне  $T$ :

$$W_j^k > W_g^k, \quad W_j^k(T) > W_g^k(T).$$

С учетом вероятностей наступления сценариев потребления ресурса во всем диапазоне  $T$ :

$$W_j^k > M(W_g^k); \quad W_j^k(T) > M(W_g^k(T)).$$

Величину избыточной по отношению к объему потребления выработки энергии можно считать мерой обеспечения надежности энергоснабжения. Мера есть связь качества и количества в момент перехода в новое качество. Мерой надежности является всякий алгоритм вывода суждений о наличии необходимого уровня надежности или степени уверенности в выполнении заданных функций некоторым объектом в прошлом, настоящем и будущем времени. Мера надежности включает в себя показатели и критерии (логические и аналитические выражения), связанные с алгоритмом вывода суждения о надежности [2].

Стоимость издержек на обеспечение надежности энергоснабжения обозначим:  $V_j^k(T) = f(W_j^k(T) - W_g^k(T))$ . Чем выше надежность системы энергоснабжения, тем дороже себестоимость вырабатываемой энергии.

Можно предложить следующую формулировку целевой функции формирования оптимальной программы развития энергетического комплекса: *обеспечение потребности потребителей*

*в тепловой и электрической энергии в необходимом объеме и с требуемой надежностью энергоснабжения, с минимальными издержками на всех этапах технологического процесса (производство, транспортировка и потребление энергоресурсов).* В условиях государственного регулирования тарифов на энергоресурсы тариф напрямую зависит от издержек производства, транспортировки энергоресурсов.

Объем капитальных вложений в год  $t$  для некоторого технического решения  $j$  равен  $K_j$  и за  $T$  лет рассчитывается по формуле

$$K_j^k = \sum_{t=1}^T K_j^k(t) x_j^k.$$

Для определенного набора технических решений в количестве  $J$  получим:

$$K_j^k = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T K_j^k(t) x_j^k.$$

Эксплуатационные издержки в год  $t$  для некоторого мероприятия  $j$  будут равны  $E_j$  и за  $T$  лет составят:

$$E_j^k = \sum_{t=1}^T E_j^k(t) x_j^k.$$

Эксплуатационные издержки, связанные с реализацией технических решений за  $T$  лет в количестве  $J$ , будут равны сумме величин эксплуатационных издержек по всем мероприятиям:

$$E_j^k = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T E_j^k(t) x_j^k.$$

Привлечение источников финансирования приводит к появлению затрат на обслуживание долга по кредиту, выделенному на реализацию технического решения  $j$  в год  $t$  в размере

$$I_j^k = \sum_{t=1}^T I_j^k(t) x_j^k.$$

Затраты на обслуживание долга на всех этапах производственного цикла за  $T$  лет составят:

$$I_j^k = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T I_j^k(t) x_j^k.$$

Затраты на обеспечение надежности энергоснабжения для определенного набора технических решений в количестве  $J$  за  $T$  лет составят:

$$V_J^k = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T V_j^k(t) x_j^k.$$

Тогда целевую функцию формирования оптимальной программы развития энергетического комплекса для ресурса  $k$  можно записать следующим образом:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T K_j^k(t) x_j^k + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T E_j^k(t) x_j^k + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T I_j^k(t) x_j^k + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T V_j^k(t) x_j^k \rightarrow \min.$$

В отечественной научной литературе вопросы оптимизации развития энергосистем рассмотрены такими известными учеными, как И.М. Артюгина, Ю.Б. Гук, Ю.Б. Клюев, А.Н. Лавров, Л.П. Падалко, В.Р. Огороков. Модели оптимизации структуры электрических сетей освещены Ю.Б. Клюевым, А.Н. Лавровым и В.Р. Огороковым [3, с. 315–323]. Имитационно-оптимизационная модель структуры генерирующей мощности энергосистем разработана И.М. Артюгиной и В.Р. Огороковым [4, с. 214–230]. Л.П. Падалко и Г.Б. Пекелис показано, что решение задачи нахождения оптимального варианта проектирования энергетических объектов по существу сводится к выбору оптимального

способа соизмерения капитальных затрат и эксплуатационных расходов [5, с. 121–148]. При этом в известных нам публикациях не рассмотрены вопросы формирования оптимальной программы развития энергетического комплекса с учетом энергосберегающих мероприятий потребителя.

Разработанная экономико-математическая модель позволяет находить оптимальный план технических решений с учетом баланса возможностей электроэнергетики и потребностей экономики в энергоресурсах, что представляет собой практическую реализацию подхода «от предложения к спросу» при поиске баланса интересов поставщика и потребителя энергоресурсов. Рассмотренный здесь подход отражает взаимосвязь капитального строительства в энергетике с производством энергоресурсов.

Таким образом, показано, что актуальность рассмотрения в программах развития технических решений в энергетике обусловлена структурой себестоимости энергии, в которой преобладающую долю (60 %) занимают затраты на строительство электростанций, включая всю цепочку создания стоимости от поставщиков энергооборудования до возведения электрических станций. Апробация рассмотренной модели способствует переходу российской экономики из стадии высокой энергоемкости, на которой она находится сегодня, на новый уровень повышения темпов энергетической эффективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроэнергетика России 2030: Целевое видение [Текст] / под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. 360 с.
2. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ю.Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 208 с.
3. Клюев, Ю.Б. и др. Экономико-математическое моделирование производственных систем энергетики [Текст]: учебник для студ. вузов / Ю.Б. Клюев, А.Н. Лавров, В.Р. Огороков. М.: Высш. шк., 1992. 430 с.
4. Артюгина, И.М. Методы технико-экономического анализа в энергетике [Текст] / И.М. Артюгина, В.Р. Огороков. Л.: Наука, 1988. 264 с.
5. Падалко, Л.П. Экономика электроэнергетических систем [Текст]: учеб. пособие для энерг. спец. вузов / Л.П. Падалко, Г.Б. Пекелис. 2-е изд. Мн.: Выш. шк., 1985. 336 с.

## REFERENCE

1. Russia Power 2030: Target Vision. Ed. Ed. BF Vainzikhher. MA: Harvard Business Review, 2008. 360 p. (rus)
2. Guk Iu.B. The theory of reliability in power: Studies. allowance for vuzov. L. Energoatomizdat. Leningr.otd., 1990. 208 p. (rus)

3. **Kluev Iu.B., Lavrov A.N., Okorokov V.R.** Economic-mathematical modeling of manufacturing systems Energy: Studies. for stud. universities. Moscow: Higher School, 1992. 430 p. (rus)
4. **Artyugin I.M., Okorokov V.R.** Methods of technical and economic analysis in the energy sector. Leningrad, Nauka, 1988. 264 p. (rus)
5. **Padalco L.P., Pekelis G.B.** Economy electric power systems: Studies. allowance for energy. specials. technical colleges. 2nd ed. Minsk, Vysh shk., 1985. 336 p. (rus)

---

**ЯДЫКИН Владимир Константинович** – старший преподаватель кафедры «Международный бизнес» отделения «Международная высшая школа управления» Инженерно-экономического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.  
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v.yadikin@gmail.com

**IADYKIN Vladimir K.** – St. Petersburg State Polytechnical University.  
195251, Polytechnicheskaya str 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: v.yadikin@gmail.com

---