

3.15. РАЗРАБОТКА ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Барыкин С.Е., д.э.н., профессор кафедры логистики и организации перевозок, Санкт-Петербургский государственный экономический университет;
Ядыкин В.К., аспирант кафедры «Международный бизнес» отделения «Международная высшая школа управления» Инженерно-экономического института, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

В статье рассмотрены понятие экономико-математической модели развития регионального энергетического комплекса в динамической постановке. Показано, что результатом реализации программы развития должны стать минимальные совокупные издержки в год каждой составляющей процесса производства, транспортировки, сбыта и потребления энергоресурсов в масштабах региона.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование программы развития регионального энергетического комплекса предполагает выбор оптимального сценария развития комплекса с учетом того, что региональный энергетический комплекс следует рассматривать как подсистему большей по масштабу системы. Под региональным энергетическим комплексом будем понимать совокупность всех участников технологической цепочки процесса – производства, транспортировки, сбыта и потребления энергоресурсов в масштабах региона. Внешние поставщики и потребители энергоресурсов регионального энергетического комплекса рассматриваются как внутренние поставщики и потребители энергоресурсов, приведенные к границам региона. Результатом реализации программы развития должны стать минимальные совокупные издержки в год каждой составляющей процесса. Разработка экономико-математической модели оптимального сценария развития регионального энергетического комплекса основана на расчете дисконтированных величин денежных потоков в процессе инвестирования в мероприятия программы и в дальнейшую эксплуатацию созданных объектов в масштабе региона и включает пять этапов.

Этап 1

Расчет объема рынка потребления продукции регионального энергетического комплекса на основании прогнозных данных об объемах потребления года t ($t = 1, 2, \dots, T$) и величины региональных тарифов на электрическую p_{et} и тепловую энергию p_{ht} на период расчета модели T . При этом период расчета T выбран таким образом, чтобы срок планирования охватывал период от момента осуществления мероприятий программы до производства новых капитальных затрат.

Тогда объем рынка потребления электроэнергии за период T равен V_e (руб./год):

$$V_e = \sum_{t=1}^T p_{et} W_{et},$$

а объем рынка тепловой энергии за период T V_h (руб./год) равен:

$$V_h = \sum_{t=1}^T p_{ht} W_{ht},$$

где W_{et} – объем потребления электроэнергии в t -й год, кВт-ч/год;

W_{ht} – объем потребления тепловой энергии в t -й год, Гкал/год.

С учетом дисконтирования объема рынка потребления электроэнергии и тепловой энергии будут определяться так:

$$V_{ed} = \sum_{t=1}^T \frac{p_{et} W_{et}}{(1+d)^t},$$

$$V_{hd} = \sum_{t=1}^T \frac{p_{ht} W_{ht}}{(1+d)^t},$$

где d – ставка дисконтирования.

Дисконтированные величины объема рынка электроэнергии и тепловой энергии являются ограничениями в модели, так как представляют собой приведенную к концу первого года предельную величину денежного потока, исходящего от потребителей субъектам электроэнергетического комплекса, вырабатывающим, передающим и распределяющим электрическую и тепловую энергию. При составлении прогноза потребления энергоресурсов учитываются суточные, дневные и месячные прогнозные графики потребления энергоресурсов потребителями, величины пиковых нагрузок, возможность перетока энергетических ресурсов как внутри региона, так и за его пределами, степень резервирования мощности и надежности энергосистемы в целом.

Этап 2

Формирование совокупности инвестиционных мероприятий в масштабе регионального энергетического комплекса.

Инвестиционные мероприятия должны учитывать совокупность всех технических параметров комплекса:

- объем вырабатываемой энергии номинальный;
- объем вырабатываемой энергии пиковый;
- объем вырабатываемой энергии минимальный;
- качество вырабатываемой энергии;
- источники выработки энергии (по структуре ресурсов);
- надежность вырабатываемой энергии;
- уровень автоматизации процесса;
- взаимосвязь системы с граничными энергетическим системами по потреблению и отпуску энергоресурсов.

Пусть существует возможность инвестирования в J мероприятий на всех этапах технологического процесса (производство, транспортировка, сбыт и потребление энергоресурсов) в течение T лет, причем $j = 1, 2, \dots, J$. Тогда, объем капитальных вложений в год t для некоторого мероприятия j равен K_j :

$$K_t = \sum_{j=1}^J K_j,$$

а за T лет для определенного набора мероприятий получим:

$$K_s = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J K_{jt}.$$

С учетом дисконтирования величина капитальных вложения в совокупность мероприятий равна:

$$K_{sd} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jt}}{(1+d)^t}.$$

С позиции системного подхода к формированию программы развития комплекса объект капитальных вложений энергетического комплекса связан с источником финансирования капитальных вложений потоком капитала.

Финансовые ресурсы в инвестиционной системе распределяются по направлениям капитальных вложений. В свою очередь мероприятия могут быть классифицированы, как по степени капиталоемкости (новое строительство, расширение, реконструкция и техническое перевооружение, модернизация, вложение с целью достижения более высоких значений технико-экономических показателей и т.д.), так и по техническим и организационным параметрам (комбинированная выработка, централизованная, децентрализованная выработка, вид потребляемого топлива, пиковые нагрузки, перетоки энергетических ресурсов внутри и за пределами региона, резервирование, надежность, системы диспетчеризации, учета и биллинга ресурсов). Следует учитывать необходимый объем работ по различным направлениям капитальных вложений.

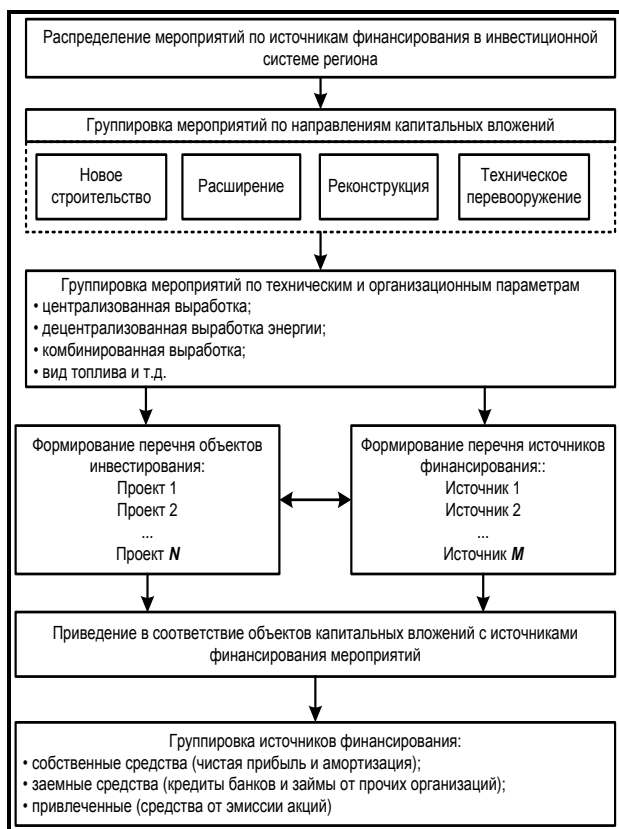


Рис. 1. Приведение в соответствие инвестиционных потребностей по объектам капитальных вложений с источниками финансирования мероприятий программы развития

Процесс распределения финансовых ресурсов по инвестиционным потребностям мероприятий программы приведен на рис. 1. При этом процесс приведения в соответствие проводится одновременно в двух направлениях: группировка мероприятий по направлениям и по техническим параметрам и пересмотр и группировка источников финансирования мероприятий по собственным, заемным и привлеченным средствам. В целом источники финансирования группируются по трем основным направлениям: собственные средства, заемные и привлеченные. Однако возможна и более подробная их классификация по усмотрению администрации региона в процессе формирования инвестиционной системы регионального энергетического комплекса.

В рассматриваемой модели производится расчет по J мероприятиям на всех этапах технологического цикла.

Этап 3

Оценка эксплуатационных издержек E , связанных с реализацией мероприятий программы.

Вначале рассчитываются эксплуатационные издержки E_j в год t для некоторого мероприятия j . Эксплуатационные издержки, связанные с реализацией мероприятий в количестве J будут равны сумме величин эксплуатационных издержек по всем мероприятиям в рассматриваемый год t :

$$E_t = \sum_{j=1}^J E_j,$$

а эксплуатационные издержки за T лет для определенного набора мероприятий в количестве J составят:

$$E_s = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J E_{jt}.$$

С учетом дисконтирования величина эксплуатационных издержек для J мероприятий равна:

$$E_{sd} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{E_{jt}}{(1+d)^t}.$$

Этап 4. Формулировка целевой функции и ограничений модели

В ряде российских публикаций, например в [5], поставлен вопрос о самой постановке цели развития российской электроэнергетики: стремление к максимальному объему выработки электрической и тепловой энергии или необходимость обеспечения заданного объема потребления электроэнергии и теплоэнергии с минимальными издержками. Действительно, инвестиции в генерирующие мощности и в развитие структуры электрических сетей по критерию максимизации выработки электроэнергии и теплоэнергии ориентированы на формирование максимального задела развития национальной экономики при условии роста потребления энергоресурсов. Однако, рост потребления энергоресурсов характеризуется ростом затрат в промышленности и увеличением расходов потребителя. Поэтому в качестве цели развития регионального энергетического комплекса можно выбрать развитие промышленного потенциала региона при удовлетворении потребностей в электро- и теплоэнергии с минимальными издержками в масштабе региона.

Согласно п. 4 ст. 2 Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» №261-ФЗ энергетическая эффективность представляет собой характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю [1].

При этом в ст. 3 Федерального закона «Об электроэнергетике» обозначено, что энергетическая эффективность электроэнергетики – это отношение поставленной потребителям электрической энергии к затраченной в этих целях энергии из невозобновляемых источников [2].

Основой для достижения энергетической эффективности является энергосбережение. В соответствии с п. 3 ст. 2 Закона №261-ФЗ энергосбережение – это реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг).

В модели должно обеспечиваться выполнение условия минимизации дисконтированных совокупных капитальных затрат и эксплуатационных издержек по всем мероприятиям:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jt}}{(1+d)^t} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{E_{jt}}{(1+d)^t} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jt} + E_{jt}}{(1+d)^t} \rightarrow \min.$$

Привлечение источников финансирования приводит к появлению затрат на обслуживание долга по кредиту на реализацию мероприятия j в год t в размере I_{jt} .

Влияние затрат на изменение тарифа учтено в модели в виде порядковых номеров значений тарифа l в последовательности ($l = 1, 2, \dots, L$).

Капитальные вложения K_{jt} в энергетические объекты, эксплуатационные издержки E_{jt} , затраты на обслуживание долга I_{jt} и прибыль компаний комплекса U_{jt} должны учитываться в размере тарифа потребителю (с порядковым номером тарифа l) на электроэнергию V_{elt} при объеме потребления электроэнергии в t -й год W_{elt} и на тепловую энергию V_{hlt} при объеме потребления тепловой энергии в t -й год W_{hlt} .

Допустим, что x_j может принимать значения ноль или единица в зависимости от того, реализуется ли мероприятие или нет (ноль, если мероприятие отклонено, и единица, если мероприятие реализуется).

Предположим, что i мероприятий реализуются на всех этапах технологического цикла выработки электроэнергии и тепловой энергии кроме потребления, а потребитель осуществляет вложения в технологии с порядковыми номерами $j_{i+1}, j_{i+2}, \dots, J$. Тогда, совокупные дисконтированные затраты потребителя электроэнергии на внедрение мероприятий, включающие капитальные вложения, эксплуатационные затраты, издержки на обслуживание долга определяются по формуле:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=i+1}^J \frac{K_{jt} + I_{jt}}{(1+d)^t} x_{jt} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=i+1}^J \frac{E_{jt}}{(1+d)^t} x_{jt}.$$

Целевую функцию и ограничения на совокупный объем дисконтированных платежей по видам вырабатываемой энергии для тарифа l следует сформулировать таким образом, чтобы формирование набора мероприятий соответствовало достижению минимальных совокупных дисконтированных издержек, включающих капитальные вложения и эксплуатационные издержки, затраты по обслуживанию долга.

Целевая функция минимизации совокупных затрат на всех этапах F в развернутом виде:

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^i \sum_{l=1}^L \frac{K_{jlt} + I_{jlt} + E_{jlt}}{(1+d)^t} x_{jlt} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=i+1}^J \sum_{l=1}^L \frac{K_{jlt} + I_{jlt} + E_{jlt}}{(1+d)^t} x_{jlt} \rightarrow \min,$$

при ограничениях для тарифа l :

Ограничение на объем совокупных издержек внедрения мероприятий (в левой части неравенства находятся совокупные приведенные затраты на этапе генерации, транспортировки, сбыта и потребления электроэнергии, а правой части – ограничение объема потребления электроэнергии):

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jlt} + I_{jlt} + U_{jlt} + E_{jlt}}{(1+d)^t} x_{jlt} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{elt} W_{elt}}{(1+d)^t}.$$

Ограничение на объем совокупных издержек внедрения мероприятий (в левой части неравенства находятся затраты на этапе генерации, транспортировки, сбыта и потребления тепловой энергии, а правой части – ограничение объема потребления тепловой энергии):

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jlt} + I_{jlt} + U_{jlt} + E_{jlt}}{(1+d)^t} x_{jlt} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{hlt} W_{hlt}}{(1+d)^t}.$$

Размер прибыли компаний комплекса U_{jt} устанавливает регулятор рынка. Федеральная служба по тарифам РФ является регулирующим органом для социально значимых отраслей экономики. Федеральная служба по тарифам формирует и ведет реестр субъектов естественных монополий, в отношении которых осуществляется государственное регулирование и контроль с целью установления тарифов и осуществления контроля по вопросам, связанным с установлением и применением тарифов [3]. Согласно п. 1 ст. 4 Федерального закона «О естественных монополиях» от 17 августа 1995 г. №147-ФЗ, услуги по передаче электрической и тепловой энергии, а также услуги по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике отнесены к сфере деятельности субъектов естественных монополий.

Федеральная служба по тарифам (ФСТ РФ) принимает нормативные правовые акты в виде приказов ФСТ РФ и иных форм, предусмотренных нормативными правовыми актами. Принятие решений по вопросам установления тарифов, а также осуществления контроля по вопросам, связанным с установлением и применением тарифов в сферах деятельности субъектов естественных монополий, осуществляется управлением ФСТ РФ [4].

Рассмотрим последовательность тарифов на электроэнергию и тепловую энергию. Примем, что порядковые номера тарифов l ($l = 1, 2, \dots, L$) изменяются так: порядковые номера тарифов на электроэнергию изменяются в интервале от 1, 2, ..., k , а порядковые номера тарифов на тепловую энергию изменяются в интервале $k+1, k+2, \dots, L$.

Рассматривая последовательно неравенства по тарифам на электрическую и тепловую энергию, можно записать систему ограничений следующим образом:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jlt_1} + I_{jlt_1} + U_{jlt_1} + E_{jlt_1}}{(1+d)^t} x_{jlt_1} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{elt_1} W_{elt_1}}{(1+d)^t};$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jlt_2} + I_{jlt_2} + U_{jlt_2} + E_{jlt_2}}{(1+d)^t} x_{jlt_2} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{elt_2} W_{elt_2}}{(1+d)^t};$$

...

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jlt_k} + I_{jlt_k} + U_{jlt_k} + E_{jlt_k}}{(1+d)^t} x_{jlt_k} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{elt_k} W_{elt_k}}{(1+d)^t};$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jlt_{k+1}} + I_{jlt_{k+1}} + U_{jlt_{k+1}} + E_{jlt_{k+1}}}{(1+d)^t} x_{jlt_{k+1}} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{hlt_{k+1}} W_{hlt_{k+1}}}{(1+d)^t};$$

Таблица 1

СИСТЕМА ОГРАНИЧЕНИЙ В ТАБЛИЧНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ (ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТАРИФАМ)

Показатель	Совокупные затраты по мероприятиям в количестве J													Ограничения по объему рынка				
	Генерация			Транспортировка			Распределение			Сбыт			Потребление					
Тарифы по видам энергии	1	2	3	4	5	6	7	8	...	j_{i-2}	j_{i-1}	j_i	j_{i+1}	j_{i+2}	...	J	По данным органов государственной власти	
Тариф на э/э I_1 , руб./кВт-ч	$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{j1t} + I_{j1t} + U_{j1t} + E_{j1t}}{(1+d)^t} x_{j1t}$													$\sum_{t=1}^T \frac{p_{e1t} W_{e1t}}{(1+d)^t}$				
Тариф на э/э I_2 , руб./кВт-ч	$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{j2t} + I_{j2t} + U_{j2t} + E_{j2t}}{(1+d)^t} x_{j2t}$													$\sum_{t=1}^T \frac{p_{e2t} W_{e2t}}{(1+d)^t}$				
...
Тариф на э/э I_k , руб./кВт-ч	$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jk t} + I_{jk t} + U_{jk t} + E_{jk t}}{(1+d)^t} x_{jk t}$													$\sum_{t=1}^T \frac{p_{ek t} W_{ek t}}{(1+d)^t}$				
Тариф на т/э I_{k+1} , руб./Гкал	$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{j(k+1)t} + I_{j(k+1)t} + U_{j(k+1)t} + E_{j(k+1)t}}{(1+d)^t} x_{j(k+1)t}$													$\sum_{t=1}^T \frac{p_{h(k+1)t} W_{h(k+1)t}}{(1+d)^t}$				
Тариф на т/э I_{k+2} , руб./Гкал	$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{j(k+2)t} + I_{j(k+2)t} + U_{j(k+2)t} + E_{j(k+2)t}}{(1+d)^t} x_{j(k+2)t}$													$\sum_{t=1}^T \frac{p_{h(k+2)t} W_{h(k+2)t}}{(1+d)^t}$				
...
Тариф на т/э L, руб./Гкал	$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jL t} + I_{jL t} + U_{jL t} + E_{jL t}}{(1+d)^t} x_{jL t}$													$\sum_{t=1}^T \frac{p_{hL t} W_{hL t}}{(1+d)^t}$				

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{j(k+1)t} + I_{j(k+1)t} + U_{j(k+1)t} + E_{j(k+1)t}}{(1+d)^t} x_{j(k+1)t} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{h(k+1)t} W_{h(k+1)t}}{(1+d)^t};$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{j(k+2)t} + I_{j(k+2)t} + U_{j(k+2)t} + E_{j(k+2)t}}{(1+d)^t} x_{j(k+2)t} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{h(k+2)t} W_{h(k+2)t}}{(1+d)^t};$$

...

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{K_{jL t} + I_{jL t} + U_{jL t} + E_{jL t}}{(1+d)^t} x_{jL t} \leq \sum_{t=1}^T \frac{p_{hL t} W_{hL t}}{(1+d)^t}.$$

Добавляются ограничения по взаимозависимости и взаимоисключению энергосберегающих мероприятий:

$$\sum_{j=1}^L x_{j1} = 1; \quad \sum_{j=1}^J x_{j1} = 1.$$

Этап 5. Реализация модели на числовом примере

Разработанная экономико-математическая модель позволяет в динамической постановке определять оптимальный набор мероприятий программы развития в зависимости от выбранных источников финансирования при различных уровнях тарифа с учетом ограничений на объем рынка электрической и тепловой энергии.

Литература

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ [Электронный ресурс] : федер. закон от 23 нояб. 2009 г. №261-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Об электроэнергетике [Электронный ресурс] : федер. закон от 26 марта 2003 г. №35-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Об утверждении Положения о Федеральной службе по тарифам [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 30 июня 2004 г. №332. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Об утверждении Регламента Федеральной службы по тарифам [Электронный ресурс] : приказ ФСТ РФ от 21 февр. 2006 г. №37. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

5. Электроэнергетика России 2030: целевое видение [Текст] / под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2008. – 360 с.

Ключевые слова

Программа развития регионального энергетического комплекса; динамическая экономико-математическая модель развития энергетического комплекса; энергетическая эффективность электроэнергетики; минимум дисконтированных совокупных капитальных затрат и эксплуатационных издержек по всем мероприятиям программы развития.

Барыкин Сергей Евгеньевич

Ядыкин Владимир Константинович

РЕЦЕНЗИЯ

Статья профессора кафедры «Логистики и организации перевозок» Санкт-Петербургского государственного экономического университета Барыкина Сергея Евгеньевича и аспиранта кафедры «Международный бизнес» отделения «Международная высшая школа управления» Инженерно-экономического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета написана на интересную и актуальную тему развития электроэнергетики России. Авторами выбран в качестве объекта исследования региональный энергетический комплекс и разработана динамическая модель формирования оптимальной программы развития регионального энергетического комплекса.

Рассматриваемая авторами экономико-математическая модель имеет явную социальную направленность, так как основана на концепции выбора мероприятий программы развития по критерию минимума дисконтированных совокупных затрат на капитальные вложения в энергетические объекты и эксплуатационных затрат для мероприятий. В явном виде прослеживается идея статьи о стремлении при формировании набора мероприятий к максимальной энергетической эффективности регионального энергетического комплекса. Система ограничений предполагает формирование только такой программы мероприятий, которая будет соответствовать платежеспособному спросу потребителей в масштабе региона, т.е. совокупные затраты по мероприятиям ограничены объемом рынка. Таким образом, выбор мероприятий осуществляется в рамках расходов, которые может себе позволить потребитель, что отражено в формулировке ограничений через произведение величины тарифа на объем потребляемой электро- и теплоэнергии.

В статье приведен обширный статистический материал, что позволяет рассматривать теоретические положения по системе инвестирования с учетом сложившейся ситуации в электроэнергетике. Можно сделать вывод, что статья может быть рекомендована к публикации.

Счисляева Е.Р., д.э.н., зам. директора Инженерно-экономического института по Международной высшей школе управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, зав. кафедрой «Международный бизнес»