

# Исследование инновационной среды формирования стратегий генерирующих компаний на рынке электроэнергии



**Н. Д. Рогалев,**  
д. т. н., профессор, зав. кафедрой  
e-mail: RogalevND@mpei.ru



**А. Ю. Амелина,**  
ассистент  
e-mail: Amel-anna@yandex.ru

**Кафедра экономики промышленности и организации предприятий, Институт проблем энергетической эффективности, Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

*В статье с помощью теории графов и экспертного анализа проведено исследование факторов, влияющих на формирование инновационной стратегии генерирующей компании на оптовом рынке электроэнергии и мощности. Авторами предлагается факторная модель, отражающая структуру параметров инновационной среды формирования стратегии и описывающая их наиболее значимые взаимосвязи. При этом показано, что состав факторов зависит от региональных особенностей.*

**Ключевые слова:** рынок электроэнергии, инновационная среда, инновационная стратегия, теория графов, факторный анализ.

Существует множество определений инновационной среды. Само понятие зародилось в 1980-х гг. как специфическая совокупность отношений производства и менеджмента, направленных на генерирование нового знания, новых процессов и новых продуктов и было предложено М. Кастельсом [1]. В данной статье под инновационной средой понимается совокупность внешних и внутренних факторов, влияющих на формирование стратегической инновации, под которой, в свою очередь, понимается стратегия роста, направленная на значительное повышение дохода предприятия путем изменения его бизнес-модели. Обобщенная схема формирования инновационной стратегии представлена на рис. 1. Как можно заметить, в данной схеме параметры инновационной среды являются частью самого механизма формирования стратегической инновации.

В качестве критерия эффективности стратегии рассматривается прибыль генерирующей компании. В упрощенном виде доход генерирующей компании за определенный период времени  $t$  на рынке на ступи вперед можно рассчитать по следующей формуле:

$$L = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^m (P - C_i) V_i, \forall (P - P_i) \geq 0, \quad (1)$$

где  $m$  — количество групп точек поставок (ГТП) рассматриваемой генерирующей компании,  $P$  — соот-

ветствующая равновесная цена;  $C_i$  — себестоимость электроэнергии, производимой оборудованием, относимым к данной ГТП;  $V_i$  — объем продажи генерирующей компании;  $P_i$  — цена электроэнергии, указанная в заявке генерирующей компании соответствующая данной ГТП.

ГТП — совокупность нескольких точек поставки участника оптового рынка, относящаяся к одному узлу расчетной модели и (или) к единому технологически неделимому энергетическому объекту.

Из формулы (1) видно, что доход генерирующей компании напрямую зависит от количества ГТП, цено-

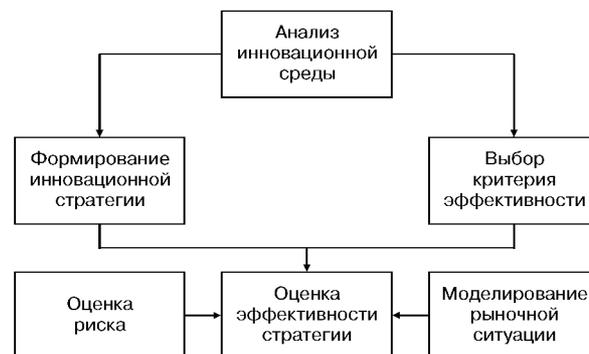


Рис. 1. Схема формирования инновационной стратегии на ОРЭМ

вые заявки которых оказались ниже цены рынка; себестоимости производства электроэнергии; равновесной цены и объема продаж по каждой ГТП. Тем не менее, помимо прямых факторов существует ряд параметров, оказывающих косвенное влияние на формирование стратегии. При анализе параметров инновационной среды особую сложность будет представлять учет их взаимного влияния друг на друга и выявление наиболее значимых факторов. В статье предлагается факторная модель, отражающая наиболее значимые параметры инновационной среды и их связи.

Для более точного отражения взаимосвязей различных факторов будем использовать математический аппарат теории графов и экспертный анализ. Экспертный анализ необходим как на начальном этапе при определении состава факторов, поскольку наличие корреляционной связи отдельных факторов не всегда свидетельствует о том, что один фактор непосредственно влияет на другой, так и на завершающем этапе при оценке удовлетворительности полученных результатов. Будем различать два типа связей: причинные и связи сопутствия [2]. Связь первого типа можно назвать влиянием, связь второго типа — взаимосвязью. Пусть дан набор существенных параметров (характеристик) некоторого объекта  $x_1, \dots, x_p, \dots, x_j, \dots, x_k$ . Пусть также все параметры, кроме двух  $x_p, x_j$  имеют постоянный уровень, и  $x_i$  будет меняться. Если при этом параметр  $x_j$  меняется, то мы говорим, что  $x_i$  непосредственно влияет на  $x_j$ . Если мы теперь изобразим параметры точками, а направления влияния стрелками, то в результате получим граф непосредственных связей. Если  $x_i$  влияет на  $x_2$  и  $x_3$ ,  $x_2$  и  $x_3$  — взаимосвязанные параметры.

Далее рассмотрим основные факторы инновационной среды формирования инновационной стратегии.

Равновесная цена на РСВ образуется в результате пересечения кривых, сформированных заявками продавцов и покупателей электроэнергии (см. рис. 2).

Кривую предложения формируют заявки генерирующих компаний, включающие желаемые объемы производства электроэнергии на каждый час суток и соответствующие им цены, с учетом регулирования системного администратора (СО) и результатов процедуры выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО). Регулирование СО необходимо для обеспечения надежности

работы рынка электроэнергии, в процессе которого решаются следующие основные задачи: управление технологическими режимами работы объектов ЕЭС России в реальном времени и обеспечение единства и эффективной работы технологических механизмов оптового и розничных рынков электрической энергии и мощности. Целью ВСВГО является определение состава включенного генерирующего оборудования и их соответствия критерию минимизации совокупной стоимости производства электроэнергии с учетом затрат на пуски (останов) оборудования. Например, вывод ГЭС в плановый ремонт из состава действующего оборудования способствует изъятию с рынка объемов электроэнергии, формирующих нижнюю часть кривой предложения. Также состав действующего оборудования определяется принадлежностью ГТП, входящих в состав станций, к рассматриваемому узлу и наличием возможности перетока свободной мощности.

Заявки на продажу электроэнергии подаются в диапазоне от минимальной до максимально возможной мощности электроэнергии [3]. На величину технического минимума автоматически формируется ценопринимая заявка, выражающая согласие на оплату электроэнергии по любой цене, которая сформируется по результатам торгов. Технический минимум нагрузки энергоблоков определяется в основном надежностью гидравлического и температурного режимов поверхностей нагрева котлов и условиями обеспечения устойчивого топочного процесса и т. д. Наличие теплофикационной выработки увеличивает технический минимум.

При загрузке станций следует учитывать их маневренность. Скорость сброса (набора) нагрузки агрегатами электростанций учитывается математической моделью РСВ при помощи системы ограничений-неравенств и влияет как на указываемые в заявках объемы, так и на совокупную кривую предложения. В соответствии с наличием трех зон суточного графика нагрузок различают базовые, полупиковые и пиковые электростанции. Для базовых станций значение числа часов использования установленной мощности можно принять в пределах от 5000 до 7500 часов в год. Для полупиковых и пиковых оно составит от 2000 до 5000 и от 500 до 2000 часов в год соответственно. К базовым электрическим станциям, прежде всего, предъявляется требование высокой тепловой экономичности, для полупиковых и пиковых станций определяющими являются высокая маневренность и низкая величина капитальных вложений, для достижения которых оправданным становится некоторое снижение экономичности.

Себестоимость электроэнергии определяется стоимостью и расходом топлива. В качестве основного топлива электростанции в России, как правило, используют газ и энергетический уголь. В качестве резервного и растопочного топлива, как правило, выступает мазут. Стоимость электроэнергии произведенной на мазуте существенно дороже стоимости электроэнергии, произведенной на газе. В связи с этим предложение, формируемое станциями, работающими на мазуте, как правило, занимает верхнюю часть кривой совокупного предложения поставщиков, в то время как угольные станции производят более

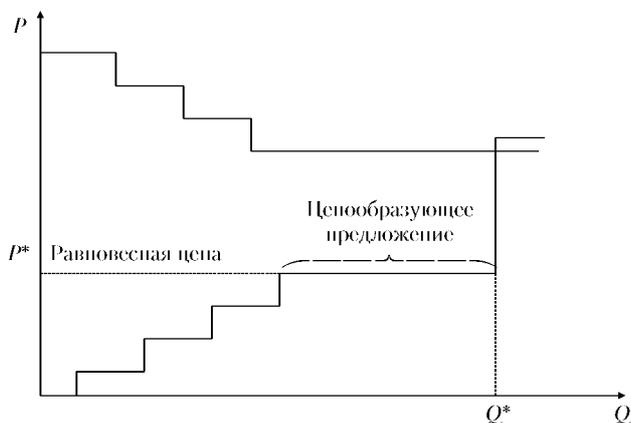


Рис. 2. Формирование равновесной цены на РСВ

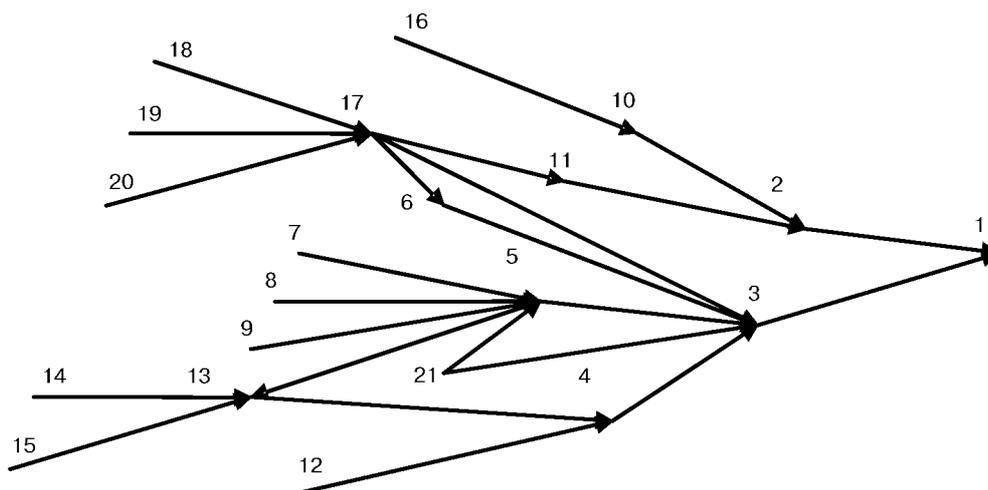


Рис. 3. Структура параметров инновационной среды

- 1 – равновесная цена; 2 – кривая спроса; 3 – кривая предложения; 4 – цены продавцов; 5 – объемы продавцов; 6 – регулирование CO<sub>2</sub>, результаты ВСВГО; 7 – объем резерва; 8 – объем ремонтов; 9 – ограничения ФАС; 10 – цены покупателей; 11 – объемы покупателей; 12 – предельный уровень регулируемой цены; 13 – себестоимость; 14 – цена топлива; 15 – расход топлива; 16 – тип продавца; 17 – объем потребления; 18 – время года; 19 – час суток; 20 – регион; 21 – маневренность станций

дешевую электроэнергию по сравнению с газовыми станциями. В отличие от газа, цены на энергетический уголь не привязаны к мировым и (или) европейским ценам из-за невысокой себестоимости добычи угля и высокой стоимости его транспортировки, делающей нерентабельной его доставку из отдаленных бассейнов. Доля мазута в топливном балансе и структуре затрат мала и не оказывает заметного влияния на рентабельность оптовых генерирующих компаний.

Не стоит упускать из внимания возможность подачи различных типов заявок. Система интегральных заявок была разработана с целью учета интегральных (суточных) топливных ограничений, если таковые у станции есть. В настоящее время подачу интегральных

заявок могут осуществлять только монотопливные станции. В неинтегральной заявке может стоять указание на намерение участника осуществлять продажу электроэнергии по модифицированным ценовым заявкам, т. е. объем продажи электроэнергии в ценовой заявке участника увеличивается или уменьшается до величины технического максимума.

На кривую спроса будут влиять объемы потребления населения и производственного сектора региона. При оценке конкуренции следует учитывать возможность увеличения спроса со стороны потребителей, в том числе за счет промышленного развития региона.

На рис. 3 представлена полученная в ходе экспертной оценки и регрессионного анализа взаимозависимости

Таблица 1

Матрица смежности исходного графа связей

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

мость параметров внешней и внутренней инновационной среды формирования стратегической инновации генерирующей компании на ОРЭМ.

Далее проведем ряд преобразований для выделения факторов, имеющих прямое влияние на формирование инновационной стратегии. Исходный граф связей описывается следующей матрицей смежности (см. табл. 1).

Выделим прямые структуры, автоматы и взаимосвязанные характеристики. Частичный граф, который отображает только влияние без обратной связи, будем называть прямой структурой. Частичный граф максимальной размерности графа связей, каждая из вершин которого входит в какой-либо контур, будем называть автоматом.

Для нахождения автоматов получим максимальный граф с соответствующей матрицей смежности. Максимальный граф — это граф, описывающий максимально возможное количество связей. Максимальный граф найдем при помощи следующего алгоритма [2].

Пусть задан некоторый граф с матрицей смежности  $A = \|a_{ij}\| (i, j = 1, \dots, k)$ .

1. В произвольной строке с номером  $i_1$  выбираем любой элемент  $a_{i_1 j_1} = 1$ . Строку  $j_1$  логически складываем со строкой  $i_1$  и записываем результат в строке  $i_1$ . Элемент  $a_{i_1 j_1}$  считаем отмеченным.
2. Из неотмеченных элементов строки  $i_1$ , которым может быть и ненулевой элемент, получившийся после шага 1, находим  $a_{i_1 j_2} = 1$ . Строку  $j_2$  логически складываем со строкой  $i_1$  и записываем результат в строке  $i_1$ . Элемент  $a_{i_1 j_2}$  считаем отмеченным.
3. После того как все  $a_{i_1 j_r} = 1 (r = 1, \dots, k)$  окажутся отмеченными, переходим к строке  $i_2$  и выполняем операции 1–2.

Перебрав все строки, получаем максимальный граф.

Для нахождения автоматов будем использовать следующий алгоритм [2].

Пусть задан некоторый граф с матрицей смежности  $A = \|a_{ij}\| (i, j = 1, \dots, k)$ .

1. Получим максимальный граф с матрицей смежности  $B = \sum_{\lambda} \lambda A$  ( $\lambda = 1, \dots, k$ ).
2. В матрице  $B$  выбираем произвольную строку  $i_1$  и столбец с номером  $j_1 = i_1$ . Таким образом, получим два вектора:  $b_{i_1 r} = \{b_{i_1 1}, b_{i_1 2}, \dots, b_{i_1 k}\}$  и  $b_{r i_1} = \{b_{1 i_1}, b_{2 i_1}, \dots, b_{k i_1}\}$ . Пересечением векторов будем считать такой вектор  $b_i = \{b_r\}$ , что  $b_r = b_{i r} \cdot b_{r i}$ . Пусть ненулевые компоненты вектора  $b_{i_1}$  образуют множество  $R$ . Тогда все параметры с номерами  $i \in R$  входят в один автомат.
3. Вычеркиваем из матрицы  $B$  все строки и столбцы с номерами  $i, j \in R$ .
4. К матрице, полученной после вычеркивания строк и столбцов, применяем шаги 2–3 до тех пор, пока не будут рассмотрены все строки и столбцы матрицы  $B$ .

Очевидно, что характеристики 1–21 не входят в автоматы, т. к.

$$\sum_{i=1}^{21} a_{ij} = 0.$$

Отсутствие автоматов существенно упрощает исследование, поскольку нет необходимости стягивать

вершины, принадлежащие одному контуру в одну точку.

Для определения непосредственных связей найдем минимальный граф для исходного. Минимальный граф — это граф, описывающий связи, которые обязательно должны быть непосредственными для сохранения структуры влияния. Для нахождения минимального графа будем использовать следующий алгоритм [2].

Пусть задан некоторый граф с матрицей смежности  $A = \|a_{ij}\| (i, j = 1, \dots, k)$ .

1. В произвольной строке матрицы  $A$  отыскиваем  $a_{i_1 j_1} = 1$ . Строку с номером  $j_1$  логически складываем со строкой  $i_1$  и результат записываем в строку  $i_1$ . Исходный элемент  $a_{i_1 j_1}$  назовем отмеченным.
2. Из множества неотмеченных исходных элементов строки  $i_1$  отыскиваем  $a_{i_1 j_2} = 1$ . Строку с номером  $j_2$  логически складываем со строкой  $i_1$  и записываем результат в строку  $i_1$ . Исходный элемент  $a_{i_1 j_2}$  назовем отмеченным.
3. После того как все исходные элементы  $a_{i_1 j_r} (r = 1, \dots, k)$  окажутся отмеченными, переходим к строке  $i_2$  и повторяем те же операции 1–2.
4. Перебрав все строки, мы получим матрицу  $A_0$ . Пусть в матрице  $A_0$  все исходные элементы равны нулю, кроме тех, где записаны единицы после действий 1–3. В результате получим матрицу  $B = \|b_{ij}\|$ .
5. В произвольной строке  $i_1$  матрицы  $B$  отыскиваем  $b_{i_1 j_1} = 1$ . Строку с номером  $j_1$  логически складываем со строкой  $i_1$  и результат записываем в строку  $i_1$ . Исходный элемент  $b_{i_1 j_1}$  назовем отмеченным.
6. В строке  $i_1$  матрицы  $B$  среди неотмеченных элементов отыскиваем элемент, равный единице. Пусть он оказался в строке  $j_2$ . Строку с номером  $j_2$  складываем логически со строкой  $i_1$  и результат записываем в строку  $i_1$ . Элемент  $b_{i_1 j_2}$  назовем отмеченным.
7. После того как все элементы строки  $i_1$ , не равные нулю, в том числе и получаемые в результате действий 5–6, окажутся отмеченными, переходим к строке  $i_2$  и повторяем шаги 5–6.
8. Перебрав все строки, мы получим  $\sum_{\lambda} B \lambda = B_2 + B_3 + \dots + B_k$ . Отыскиваем  $L = A \sum_{\lambda} B \lambda$ , принимая во внимание, что  $b_{ij}^{\lambda} = a_{ij} b_{ij}^{\lambda}$  для всех  $i, j$ . Наконец,  $A_0 = A - L$ .

В результате, получим минимальный граф, который можно отразить при помощи соответствующей матрицы смежности.

Как можно заметить, после построения минимального графа влияние маневренности станций и потребления электроэнергии на кривую предложения исключено из состава непосредственных связей.

В настоящее время в развивающейся теории энергетических рынков наиболее рассмотрено и изучено возможное поведение субъектов рынка при условии, когда предложение доминирует над спросом. Тем не менее, возможна и обратная ситуация, особенно актуальная для энергосистемы России, включающей несколько зон свободного перетока, отличающихся своими особенностями.

При условии, когда спрос превышает предложение, покупатели имеют немного возможностей влияния

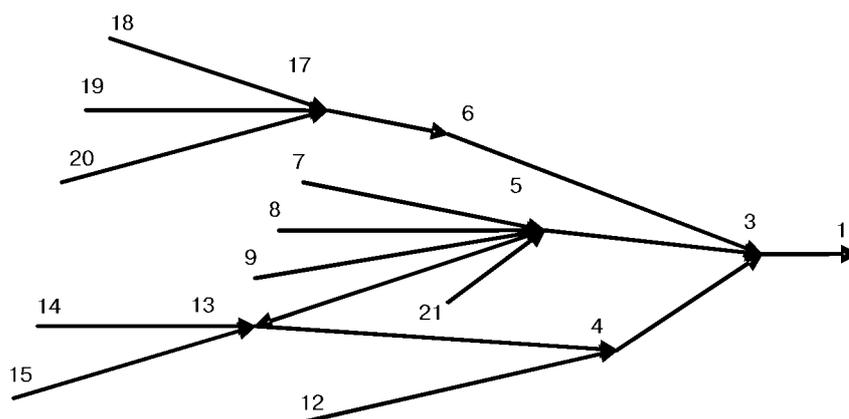


Рис. 4. Структура параметров инновационной среды при условии, когда спрос преобладает над предложением  
 1 – равновесная цена; 3 – кривая предложения; 4 – цены продавцов; 5 – объемы продавцов; 6 – регулирование CO<sub>2</sub>, результаты ВСВГО; 7 – объем резерва; 8 – объем ремонтов; 9 – ограничения ФАС; 12 – предельный уровень регулируемой цены; 13 – себестоимость; 14 – цена топлива; 15 – расход топлива; 17 – объем потребления; 18 – время года; 19 – час суток; 20 – регион; 21 – маневренность станций

на равновесную цену и рыночную ситуацию в целом в отличие от продавцов. В таком случае, факторный анализ влияния на равновесную цену необходим для построения нормативных прогнозов, предполагающих формирование будущих представлений о ее значении с учетом актуальной информации и возможных действий, предпринимаемых генерирующими компаниями – активными участниками ОРЭМ.

Как было сказано выше, в России на рынке электроэнергии действует поузловое ценообразование, т. е. можно предположить, что состав параметров инновационной среды для различных энергосистем может существенно отличаться.

С учетом проанализированных условий функционирования ОРЭМ, исследуем факторы, влияющие на равновесную цену при условии, когда спрос доминирует над предложением, и выделим наиболее важные из них.

Очевидно, что при условии, когда спрос преобладает над предложением, влияние со стороны кривой спроса можно считать несущественным. Проведя небольшие преобразования над структурой графа непосредственных связей (минимального графа), получим следующую взаимозависимость факторов, влияющих на кривую предложения (см. рис. 4).

Полученный состав факторов, прямым образом влияет на равновесные цены ОРЭМ и определяет минимальный набор переменных, которые должны лежать в основе упрощенной модели РСВ при условии, когда спрос превышает предложение. Таким образом, можно сделать вывод, что состав параметров инновационной среды для различных региональных рынков может отличаться.

## Выводы

В заключение можно сделать следующие выводы. Исследование экономических явлений представляет особую сложность, поскольку представляет собой анализ переплетения разнородных факторов, которые не всегда можно оценить количественно. Анализ осложняется еще и тем, что информация о параметрах исследуемой экономической среды очень часто доходит в искаженном виде из-за невозможности точного учета

их взаимного влияния друг на друга. Тем не менее, анализ параметров инновационной среды необходим, поскольку, как было показано, он является частью самого механизма формирования стратегической инновации и необходим при моделировании рыночной ситуации. Для выявления наиболее значимых параметров инновационной среды и исключения несущественных взаимосвязей была предложена факторная модель, составленная при помощи теории графов. Использование математического аппарата необходимо, в первую очередь, для количественной оценки эффективности инновационной стратегии. При этом качестве критерия эффективности рассматривается прибыль генерирующей компании. Также доказывается необходимость экспертного анализа. В качестве примера приводится существование в теории вероятности коэффициента корреляции, существенность величины которого указывает на стохастическую связь, но не определяет меры связи [2] и причинно-следственную зависимость. Помимо вышеперечисленного, сделан вывод о том, что состав параметров инновационной среды может меняться, и зависит от типа регионального рынка.

### Список использованных источников

1. М. Кастельс. Информационная эпоха: экономика, общество и культура / Пер. с англ. под науч. ред. О. И. Шкаратана. М.: ГУ ВШЭ, 2000.
2. Ф. М. Бородкин. Статистическая оценка связей экономических показателей. М.: Статистика, 1968.
3. М. Королев, Д. Узлов. Составляем заявки на продажу? // Энергорынок, № 6, 2004.
4. А. Д. Качан. Режимы работы и эксплуатации тепловых электрических станций: учеб. пособие. Минск: Вышэйшая, 1978.

### The research of the generating companies strategies formation innovative environment in the electricity market

**N. D. Rogalev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Institute of Power Engineering Efficiency Problems, the Department of Economics of Industry and Enterprise Management.

**A. Yu. Amelina**, Assistant lecturer, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Institute of Power Engineering Efficiency Problems, the Department of Economics of Industry and Enterprise Management.

The paper studies factors influencing the generating company innovative strategy formation in the wholesale market of electricity and power, using the graph theory and expert analysis. The authors propose factor model, that reflects the structure of the strategy formation innovative environment parameters and describes their most important relationships. Study shows that the composition of factors depends on the regional distinctions.

**Keywords:** electricity market, innovative environment, innovative strategy, graph theory, factor analysis.