



DOI: 10.34831/EP.2022.88.71.002  
УДК 621

### Математическая модель розничного рынка электрической и тепловой энергии

МОЛОДЮК В. В., доктор техн. наук

Некоммерческой партнерство «Научно-технический совет

Единой энергетической системы», 111250, Москва, пр. Завода Серп и Молот, 10  
vm@nts-ees.ru

Рассмотрена математическая модель розничного рынка электрической и тепловой энергии. Сделана попытка построить кривые спроса потребителей на основе функций полезности электрической и тепловой энергии. В модели применены следующие новшества: для определения оптимального режима работы рынка используется критерий максимального суммарного выигрыша всех участников рынка (производителей и потребителей); затраты на топливо ТЭЦ не делятся заранее между электрической и тепловой энергией, а определяются в результате оптимизации режима работы рынка; розничный рынок работает как совместный рынок электрической и тепловой энергии. Показано, что вывод ТЭЦ на оптовый рынок повышает цены на электрическую и тепловую энергию для потребителей и снижает экономическую эффективность работы субъектов рынка, в том числе и самой ТЭЦ.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** розничный рынок электрической и тепловой энергии, кривая спроса потребителя, суммарный выигрыш субъектов рынка.

**К**омбинированное производство электроэнергии и тепла (теплофикация) на электростанциях, сжигающих органические топливо, остаётся эффективным энерго- и ресурсосберегающим процессом. Во всех крупных городах нашей страны работают ТЭЦ, обеспечивающие потребителей электрической и тепловой энергией. Большую часть электроэнергии, потребляемой крупными городами, экономически целесообразно производить на ТЭЦ в комбинированном цикле. При наличии крупной тепловой нагрузки принцип теплофикации должен быть обязательным. Однако функционирующая в настоящее время модель оптового рынка электроэнергии разрушила этот принцип. Так, обязательное участие ТЭЦ мощностью 25 МВт и выше на оптовом рынке привело к тому, что ТЭЦ стали убыточными, а розничные рынки лишились своих основных поставщиков энергии. Для того, чтобы сохранить конкурентоспособность на оптовом рынке электроэнергии с КЭС, ТЭЦ стали перекладывать затраты с электрической на тепловую энергию. Повышение цены на тепловую энергию привело к тому, что промышленные потребители в массовом порядке начали строить собственные источники тепловой энергии — котельные.

Высокие тарифы на электроэнергию «душат» промышленных потребителей, не давая развиваться российской экономике [1, 2]. В целях создания эффективной конкуренции за поставки электроэнергии и тепла необходимо дать воз-

можность ТЭЦ работать на розничных рынках, а потребителям — заключать с ТЭЦ прямые договоры. Сейчас они этой возможности лишены.

Совместный розничный рынок электроэнергии и тепла в России до сих пор не создан. Основная причина — сложные экономические связи субъектов розничного рынка и их слабая изученность. Анализ закономерностей работы розничного рынка может помочь его математическая модель.

Торговля электрической энергией и теплом на рынке изменила представление об эффективных режимах работы энергосистемы. На смену принципу достижения параметров, снижающих затраты на производство энергии при заданной выработке энергии, на первое место вышла прибыль.

#### Модель розничного рынка

В реальных условиях рынка совершенной конкуренции не существует. На рынке любого товара действуют многочисленные условия и ограничения, удаляющие фактический рынок от совершенного. Однако изучение совершенного рынка совсем отбрасывать не стоит. Модель совершенного рынка целесообразно использовать для понимания рыночных механизмов. В этом случае использование различного рода допущений при использовании действующих правил рынка может быть оценено экономическими показателями, по которым можно установить, насколько

далеко действующий рынок ушёл от совершенного.

Для построения математической модели розничного рынка примем следующие условия:

- на розничном рынке работают ТЭЦ, котельная и потребители электрической и тепловой энергии;
- на оптовом рынке работает КЭС. Электроэнергия КЭС поставляется и на розничный рынок;
- кривые полезности электроэнергии и тепла выходят из начала координат, непрерывны, вогнуты вверх и обладают признаком насыщения (эффективность потребления каждой последующей единицы энергии снижается) [3]. Значение полезности предлагается оценивать как удельную добавленную стоимость выпускаемого потребителем товара при покупке им на рынке единицы энергии, используемой в процессе производства данного товара. Перечисленные свойства дают возможность построить кривые спроса потребителей (дают возможность дифференцировать кривые полезности);
- кривые затрат ТЭЦ, КЭС и котельной также выходят из начала координат, непрерывны, имеют возрастающий характер и вогнуты вниз. Перечисленные свойства кривых затрат дают возможность построить кривые предложения;
- эффективность рынка рассматривается не только как эффективность производства энергии, но и как эффективность её использования и оценивается суммарным (полным) выигрышем потребителей энергии и её производителей, образующих энергосистему. В такой постановке объёмы производимых электроэнергии и тепла являются искомыми переменными.

Рынок совершенной конкуренции обеспечивает:

- производство электроэнергии и тепла с наименьшими затратами;
- потребление электроэнергии и тепла с наибольшей полезностью;
- производство только необходимого (оптимального) объёма электроэнергии и тепла (поэтому объёмы потребления энергии на рынке являются искомыми переменными);
- установление оптимальных рыночных цен на электрическую и тепловую энергию.

Представим кривые полезности электроэнергии и тепла квадратичной функцией, имеющей непрерывный характер и выходящей из начала координат. Полезность использования электрической энергии потребителем  $P_{эз}$ , тыс. руб/ч, представим следующим выражением:

$$P_{эз} = c_3 P_n - r_3 P_n^2, \quad (1)$$

где  $c_3$  — удельная максимальная полезность электроэнергии у потребителя (полезность первого потреблённого мегаватт-часа);  $r_3$  — коэффициент снижения полезности электроэнергии у потребителя;  $P_n$  — часовое потребление

электроэнергии (мощность потребления).

Полезность использования потребителем тепловой энергии  $P_{ТЭ}$  представим аналогичным выражением:

$$P_{ТЭ} = c_T Q_n - r_T Q_n^2, \quad (2)$$

где  $c_T$  — удельная максимальная полезность тепловой энергии у потребителя;  $r_T$  — коэффициент снижения полезности потребления тепловой энергии;  $Q_n$  — часовое потребление тепловой энергии потребителем.

Выигрыш потребителей электроэнергии ( $\Phi_{ЭЭ}$ ) оценивается значением балансовой прибыли (прибыль до отчисления налогов) и определяется как разность между полезностью потребления электроэнергии и затратами на её покупку на рынке:

$$\Phi_{ЭЭ} = c_Э P_n - r_Э P_n^2 - \lambda_Э P_n, \quad (3)$$

где  $\lambda_Э$  — рыночная цена на электроэнергию, тыс. руб/(МВт·ч).

Выигрыш (балансовая прибыль) потребителя тепловой энергии  $\Phi_{ТЭ}$ , тыс. руб/ч, также определяется разностью полезности тепловой энергии у потребителя и затратами на её покупку:

$$\Phi_{ТЭ} = c_T Q_n - r_T Q_n^2 - \lambda_T Q_n, \quad (4)$$

где  $\lambda_T$  — цена тепловой энергии на розничном рынке, тыс. руб/Гкал.

### Кривые спроса на электрическую и тепловую энергию

Экономическая теория рынка электроэнергии строится на использовании кривой спроса потребителя [3]. Это можно делать только в том случае, если кривая спроса определена, и её свойства достаточно хорошо изучены. Для рынка электроэнергии это далеко не так. О кривой спроса на электрическую и тепловую энергию ничего не известно. Фактически спрос на электроэнергию и тепло не зависит от их текущей цены на рынке, а потребители не уменьшают своё потребление даже при росте цены или реагируют на её изменение с большой задержкой. Потребитель меняет спрос только по условиям самих потребителей или по обстоятельствам, от потребителей не зависящим. И всё-таки, без численного представления кривой спроса потребителей невозможно построить рынок любого товара. На действующем оптовом рынке электроэнергии из такого положения выходят назначением ступенчатых кривых спроса, формируемых по двум связанным между собой показателям — заявленному объёму потребляемой электроэнергии и цене, по которой потребитель соглашается купить этот объём электроэнергии.

Зависимость спроса на электрическую и тепловую энергию от их цены — это частные производные кривых полезности электрической и тепловой энергии (1) и (2) по объёмам потребления электрической и тепловой энергии соответственно. В результате дифференцирования выражения (1) по элек-

трической нагрузке потребителя  $P_n$  получим кривую спроса потребителя на электрическую энергию

$$C_{ЭЭ} = c_{ЭЭ} - 2r_{ЭЭ} P_n.$$

Аналогично дифференцированием выражения (2) по тепловой нагрузке потребителя  $Q_n$  получим кривую спроса потребителя на тепловую энергию:

$$C_{ТЭ} = c_{ТЭ} - 2r_{ТЭ} Q_n.$$

### Метод совокупной продукции

Себестоимость производства электрической и тепловой энергии является основной составляющей в ценовой заявке производителя. Для ТЭЦ — это в основном затраты на топливо. Способ разделения затрат ТЭЦ на топливо между электроэнергией и теплом принципиальным образом влияет на цену электрической и тепловой энергии.

До 1995 г. при распределении экономии топлива от теплофикации использовали «физический» метод, по которому всю экономию топлива относили целиком на электроэнергию. Такое решение носило, в том числе, и ведомственный характер, поскольку строительство ТЭЦ осуществляло Минэнерго СССР. Проблеме разделения затрат на топливо между электроэнергией и теплом посвящены десятки работ, и окончательным результатом дискуссий по этой проблеме стало понимание того, что однозначно это сделать нельзя. Выходом из сложившегося положения может стать применение принципиально другого подхода, который вообще не делит затраты топлива между двумя видами энергии. В этом случае затраты на электрическую и тепловую энергию разделяются сами по экономическим критериям в процессе поиска оптимальных рыночных цен.

Суть данного подхода состоит в следующем [4]. В теплофикационной установке ТЭЦ производство электрической и тепловой энергии происходит в едином технологическом процессе, поэтому обоснованно можно определить только зависимость удельного расхода топлива ( $v_{ТЭЦ}$ ) от производства совокупной продукции  $P_{сов}$ .

Совокупная продукция ТЭЦ определяется как сумма двух видов энергии: электрической нагрузки  $P_{ТЭЦ}$  и приведённой нагрузки теплофикационных отборов  $Q_{ТЭЦ}$

$$P_{сов} = P_{ТЭЦ} + b_Э Q_{ТЭЦ}, \quad (5)$$

где  $b_Э$  — электрический эквивалент 1 Гкал, равный 1,163 МВт·ч/Гкал.

В [4] предлагается использовать зависимость удельного расхода топлива  $v_{ТЭЦ}$  от соотношения электрической нагрузки  $P_{ТЭЦ}$  и отборов тепла  $Q_{ТЭЦ}$ :

$$v_{ТЭЦ} = a + m k_Э - e k_Э^2,$$

где  $a$ ,  $m$ ,  $e$  — коэффициенты в кривой зависимости удельного расхода топлива  $v_{ТЭЦ}$  от объёма совокупной продукции  $P_{сов}$ ;  $k_Э = P_{ТЭЦ} / b_Э Q_{ТЭЦ}$  — отношение электрической нагрузки ТЭЦ к приведённой тепловой нагрузке ТЭЦ.

Затраты  $Z_{ТЭЦ}$  определяются следующим условием:

$$Z_{ТЭЦ} = a_{ТЭЦ} (P_{ТЭЦ} + b_Э Q_{ТЭЦ})^2, \quad (6)$$

где  $a_{ТЭЦ}$  — коэффициент затрат при квадрате совокупной продукции ТЭЦ.

Выигрыш ТЭЦ устанавливается следующим образом:

$$\Phi_{ТЭЦ} = \lambda_Э P_{ТЭЦ} + \lambda_T Q_{ТЭЦ} - a_{ТЭЦ} (P_{ТЭЦ} + b_Э Q_{ТЭЦ})^2. \quad (7)$$

Выигрыши КЭС и котельной определяется соответственно как

$$\Phi_{КЭС} = \lambda_Э P_{КЭС} - a_{КЭС} P_{КЭС}^2, \quad (8)$$

$$\Phi_{кот} = \lambda_T Q_{кот} - a_{кот} Q_{кот}^2, \quad (9)$$

где  $a_{КЭС}$  и  $a_{кот}$  — коэффициенты затрат при квадрате производства электроэнергии и тепла соответственно на КЭС и котельной.

### Кривые предложения

В условиях неэластичности спроса потребителей активной стороной, определяющей рыночную цену на электроэнергию и тепло, выступают её производители, поскольку эластичность предложения, в отличие от эластичности спроса, очень высока и хорошо изучена. Однако при установлении параметров кривой предложения также возникают большие трудности. Дело в том, что электроэнергия и тепло производятся на разных по технологии и мощности электростанциях, а кривая затрат не имеет непрерывного характера. Затратные характеристики разных типов электростанций (КЭС, АЭС, ГЭС и ТЭЦ) существенно различаются, а характеристики относительных приростов затрат не могут быть представлены монотонно возрастающими и выпуклыми вниз кривыми. Для отдельных типов электростанций эти кривые можно описать в лучшем случае линейными или выпуклыми вверх характеристиками.

Кривую предложения (кривую относительных приростов расхода топлива) отдельного энергоблока можно получить путём дифференцирования расходной характеристики этого энергоблока. Однако затраты холостого хода являются постоянной величиной, не поддаются дифференцированию и поэтому не могут быть учтены в кривой предложения. Не учитывает кривая предложения и расход топлива на пуск-останов агрегатов. И всё-же условное представление затратной характеристики ТЭЦ в виде непрерывной квадратичной функции, выходящей из начала координат, даёт возможность получить кривую предложения ТЭЦ.

Дифференцированием (6) отдельно по  $P_{ТЭЦ}$  и  $Q_{ТЭЦ}$  получим кривые предложения ТЭЦ соответственно на электрическую

$$C_{ТЭЦ ЭЭ} = 2a_{ТЭЦ} (P_{ТЭЦ} + b_Э Q_{ТЭЦ}),$$

и тепловую энергию

$$C_{ТЭЦ ТЭ} = 2a_{ТЭЦ} b_Э (P_{ТЭЦ} + b_Э Q_{ТЭЦ}).$$

Аналогичным образом получим кри-  
вые предложения для котельной

$$C_{\text{кот}} = 2a_{\text{кот}} Q_{\text{кот}}$$

и КЭС

$$C_{\text{КЭС}} = 2a_{\text{КЭС}} P_{\text{КЭС}}.$$

В рассматриваемой модели удель-  
ные затраты ТЭЦ на выработку единицы  
совокупной продукции  $a_{\text{КЭС}}$  задаются.  
Однако эта величина сама является ис-  
комой переменной, поскольку зависит  
от удельного расхода топлива на выра-  
ботку единицы совокупной продукции  
ТЭЦ. В свою очередь,  $v_{\text{ТЭЦ}}$  зависит от  
соотношения электрической и тепловой  
нагрузки ТЭЦ. Оптимальное соотноше-  
ние выработки электрической и тепло-  
вой энергии на ТЭЦ ( $k_3$ ) предлагается  
получать итерационным расчётом ис-  
пользуя для этого выражение (6). Здесь  
этот подход не рассматривается.

### Суммарный выигрыш объектов электроэнергетики при их совместной работе на рынке электроэнергии и тепла

Рынок электроэнергии и тепла дол-  
жен строиться так, чтобы он был эффек-  
тивен для всех его участников — прои-  
зводителей и потребителей энергии. Без  
учёта интересов потребителей невоз-  
можно построить эффективный рынок:  
тарифы на электроэнергию и тепло при  
такой модели рынка будут только расти  
в интересах поставщиков и в ущерб по-  
требителям. Поэтому эффективность  
рынка предлагается оценивать не толь-  
ко как эффективность производства  
электроэнергии и тепла, но и как эф-  
фективность потребления энергии. Эти  
два условия — эффективность произ-  
водства и эффективность потребления —  
целесообразно объединить в один об-  
щий критерий — суммарный выигрыш  
субъектов розничного рынка [5].

Целевую функцию — суммарный вы-  
игрыш субъектов розничного рынка  
 $\Phi$  — представим суммой (3), (4) и (7) – (9),  
т.е. следующим условием:

$$\Phi = c_p P_n - r_p P_n^2 + c_t Q_n - r_t Q_n^2 - a_{\text{ТЭЦ}} (P_{\text{ТЭЦ}} + b_3 Q_{\text{ТЭЦ}})^2 - a_{\text{кот}} Q_{\text{кот}}^2 - a_{\text{КЭС}} P_{\text{КЭС}}^2. \quad (10)$$

Суммарные затраты потребителей на  
покупку электроэнергии и тепла всегда

равны выручке от реализации электри-  
ческой и тепловой энергии ТЭЦ, т.е.  
всегда выполняется условие

$$\lambda_3 P_n + \lambda_t Q_n = \lambda_3 (P_{\text{ТЭЦ}} + P_{\text{КЭС}}) + \lambda_t (Q_{\text{ТЭЦ}} + Q_{\text{кот}}),$$

и поэтому затраты потребителей на  
покупку электроэнергии и тепла и вы-  
ручка ТЭЦ, КЭС и котельной от продажи  
электрической и тепловой энергии в (10)  
не входят.

Поиск максимума функции (10) необ-  
ходимо проводить с учётом условий  
связи (часовых балансов электроэнер-  
гии и тепла в узлах энергосистемы):

$$P_{\text{ТЭЦ}} + P_{\text{КЭС}} - P_n = 0, \quad (11)$$

$$Q_{\text{ТЭЦ}} + Q_{\text{кот}} - Q_n = 0. \quad (12)$$

Ограничения по выработке и потреб-  
лению энергии и мощности в модели  
предлагается учитывать в процессе оп-  
тимизации путём корректировки иско-  
мых переменных.

### Расчёт эффективности работы рынка электрической и тепловой энергии с использованием критерия достижения максимального выигрыша всех участников рынка

Для отыскания численных значений  
искомых переменных, при которых  
функция суммарного выигрыша роз-  
ничного рынка (10) достигает своего  
максимального значения, предлагается  
использовать метод неопределённых  
множителей Лагранжа, который широ-  
ко применяется в решении энергетиче-  
ских задач. Уникальность данного мето-  
да заключается в том, что он позволяет  
определить максимум функции (10)  
с учётом связей (11) и (12).

Из выражений (10)–(12) составим  
функцию Лагранжа:

$$L = c_p P_n - r_p P_n^2 + c_t Q_n - r_t Q_n^2 - a_{\text{ТЭЦ}} (P_{\text{ТЭЦ}} + b_3 Q_{\text{ТЭЦ}})^2 - a_{\text{кот}} Q_{\text{кот}}^2 - a_{\text{КЭС}} P_{\text{КЭС}}^2 + \lambda_3 (P_{\text{ТЭЦ}} + P_{\text{КЭС}} - P_n) + \lambda_t (Q_{\text{ТЭЦ}} + Q_{\text{кот}} - Q_n). \quad (13)$$

В результате дифференцирования  
выражения (13) получаем систему из  
уравнений, представленных в табл. 1.

Неопределённые множители Ла-  
гранжа  $\lambda_3$  и  $\lambda_t$  устанавливают цену на  
электрическую и тепловую энергию  
ТЭЦ соответственно. Искомыми пере-

менными в (13) являются  $P_{\text{ТЭЦ}}$ ,  $Q_{\text{ТЭЦ}}$ ,  
 $P_{\text{КЭС}}$ ,  $Q_{\text{кот}}$ ,  $P_n$ ,  $Q_n$  и  $\lambda_3$ ,  $\lambda_t$ . Совместное  
решение системы уравнений, приве-  
дённых в табл. 1, методом последова-  
тельных исключений Гаусса даёт опти-  
мальное значение целевой функции  
(13).

### Пример расчёта эффективности работы рынка электроэнергии и тепла по предложенной модели

#### ТЭЦ — субъект розничного рынка

Пусть ТЭЦ является субъектом роз-  
ничного рынка. Для расчётного приме-  
ра установим следующие значения ис-  
ходных показателей:

- Коэффициент затрат при квадрате  
выработке совокупной продукции  
ТЭЦ  $a_{\text{ТЭЦ}}$ , тыс. руб./ $(\text{МВт}^2 \cdot \text{ч})$  ..... 0,005
- Коэффициент затрат при квадрате  
выработки электроэнергии  
КЭС  $a_{\text{КЭС}}$ , тыс. руб./ $(\text{МВт}^2 \cdot \text{ч})$  ..... 0,02
- Коэффициент затрат при квадрате  
выработки тепловой энергии  
котельной  $a_{\text{кот}}$ , тыс. руб./ $\text{Гкал}^2$  ..... 0,02
- Максимальная полезность единицы  
электрической энергии  $c_p$ ,  
тыс. руб./ $(\text{МВт} \cdot \text{ч})$  ..... 4
- Коэффициент снижения полезности  
потребления электрической  
энергии  $r_p$ , тыс. руб./ $(\text{МВт}^2 \cdot \text{ч})$  ..... 0,005
- Максимальная полезность единицы  
тепловой энергии  $c_t$ , тыс. руб./ $\text{Гкал}$  ..... 4
- Коэффициент снижения полезности  
потребления тепловой энергии  $r_t$ ,  
тыс. руб./ $\text{Гкал}^2$  ..... 0,005

Результаты сравнительного расчёта  
оптимального режима работы энерго-  
системы (вариантов работы ТЭЦ на роз-  
ничном и оптовом рынке) приведены  
в табл. 2.

Из результатов расчёта, приведённых  
в табл. 2, следует, что при работе ТЭЦ на  
розничном рынке её нагрузка составля-  
ет 122 МВт и 83 Гкал/ч соответственно  
электрической и тепловой мощности.  
ТЭЦ является основным поставщиком  
энергии на розничный рынок. Котель-  
ная обеспечивает меньшую тепловую  
нагрузку — 63 Гкал/ч. С оптового рынка  
на розничный рынок потребители поку-  
пают 56 МВт мощности. Рыночная цена  
на электроэнергию установилась в раз-  
мере 2,22 руб. за кВтч, а на тепловую  
энергию — 2,54 руб. за Гкал.

#### ТЭЦ — субъект оптового рынка

Пусть теперь ТЭЦ — субъект оптово-  
го рынка. В этом случае потребители

Таблица 1

Переменная, по которой дифференцируют функцию Лагранжа	Уравнение, полученное в результате дифференцирования	Физический смысл уравнения
Электрическая нагрузка потребителей $P_n$	$P_n = (c_p - \lambda_3) / 2r_p$	Объём электроэнергии, покупаемой потребителем
Тепловая нагрузка потребителей $Q_n$	$Q_n = (c_t - \lambda_t) / 2r_t$	Объём тепловой энергии, покупаемой потребителем
Нагрузка котельной $Q_{\text{кот}}$	$Q_{\text{кот}} = \lambda_t / 2a_{\text{кот}}$	Количество тепловой энергии, отпускаемое котельной
Электрическая нагрузка ТЭЦ $P_{\text{ТЭЦ}}$	$\lambda_3 = 2a_{\text{ТЭЦ}} (P_{\text{ТЭЦ}} + b_3 Q_{\text{ТЭЦ}})$	Цена на электроэнергию ТЭЦ
Тепловая нагрузка ТЭЦ $Q_{\text{ТЭЦ}}$	$\lambda_t = 2a_{\text{ТЭЦ}} b_3 (P_{\text{ТЭЦ}} + b_3 Q_{\text{ТЭЦ}})$	Цена на тепловую энергию ТЭЦ
Нагрузка КЭС $P_{\text{КЭС}}$	$\lambda_3 = 2a_{\text{КЭС}} P_{\text{КЭС}}$	Цена на электрическую энергию КЭС
Цена на электрическую энергию $\lambda_3$	$P_{\text{ТЭЦ}} + P_{\text{КЭС}} - P_n = 0$	Баланс электрической энергии
Цена на тепловую энергию $\lambda_t$	$Q_{\text{ТЭЦ}} + Q_{\text{кот}} - Q_n = 0$	Баланс тепловой энергии

Таблица 2

Показатель	Оптимальное значение показателя при работе ТЭЦ	
	на розничном рынке	на оптовом рынке
Электрическая нагрузка потребителей $P_{п}$ , МВт	178	164
Тепловая нагрузка потребителей $Q_{п}$ , Гкал/ч	146	125
Электрическая нагрузка ТЭЦ $P_{ТЭЦ}$ , МВт	122	104
Теплофикационная нагрузка ТЭЦ $Q_{ТЭЦ}$ , Гкал/ч	83	56
Нагрузка котельной $Q_{кот}$ , Гкал/ч	63	69
Нагрузка КЭС $P_{КЭС}$ , МВт	56	60
Цена на электроэнергию $\lambda_{э}$ , руб / (кВт·ч)	2,22	2,36
Цена на тепловую энергию $\lambda_{т}$ , тыс. руб / Гкал	2,54	2,75

получают электрическую энергию ТЭЦ с надбавками за виртуальные услуги оптового рынка, которые увеличивают затраты ТЭЦ на 40 %, т. е.  $\alpha_{ТЭЦ} = 0,007$ . Увеличение затрат на электроэнергию ТЭЦ объясняется дополнительными платежами потребителей за услуги оптового рынка. Все остальные показатели в расчётом примере остаются прежними.

Из результатов расчёта следует, что при выводе ТЭЦ на оптовый рынок потребители розничного рынка были вынуждены снизить своё потребление со 178 до 164 МВт и со 146 до 125 Гкал/ч. Цена на электроэнергию возросла с 2,22 до 2,36 тыс. руб/(МВт·ч), а для тепловой энергии она выросла с 2,54 до 2,75 тыс. руб/Гкал. Получение электроэнергии КЭС с оптового рынка увеличи-

лось с 56 до 60 МВт. Тепловая нагрузка ТЭЦ снизилась с 83 до 56 Гкал/ч, а котельной, наоборот, возросла с 63 до 69 Гкал/ч.

А теперь проанализируем изменение оборота торговли электроэнергией при выводе ТЭЦ на оптовый рынок (табл. 3). Как уже отмечалось, при выводе ТЭЦ на оптовый рынок потребители снизили своё потребление со 178 до 164 МВт. Получение электроэнергии с оптового рынка за счёт вывода на него ТЭЦ возросло с 56 до 164 МВт.

Выручка от продажи электроэнергии с оптового рынка возросла со 124 до 387 тыс. руб/ч. Однако выигрыш потребителей снизился: для потребителей электроэнергии — со 159 до 135 тыс. руб/ч, а для потребителей тепловой энергии — со 107 до 78 тыс. руб/ч. Суммарный выигрыш потребителей упал с 266 до 213 тыс. руб/ч.

Суммарный выигрыш производителей энергии также снизился с 385 до 364 тыс. руб/ч. Однако для ТЭЦ и для котельной он возрос соответственно с 61 до 70 тыс. руб/ч и с 81 до 95 тыс. руб/ч. Но это повышение выручки не смогло компенсировать её значительного снижения для ТЭЦ — основного поставщика электроэнергии на оптовый рынок. Выигрыш энергосистемы снизился с 651 до 577 тыс. руб/ч.

Таким образом, при общем значительном росте выручки от продажи электроэнергии с оптового рынка в целом и потребители, и производители энергии оказались в проигрыше от вывода ТЭЦ на оптовый рынок. Основной рост выручки от продажи электроэнергии с оптового рынка объясняется переносом выручки ТЭЦ с розничного на оптовый рынок. Следует отметить, что снижение выигрыша для потребителей оказалось в 2,5 раза больше, чем для производителей: 53 против 21 тыс. руб/ч.

### Заключение

1. Переход на рыночные отношения в торговле электрической энергией и теплом меняет критерий эффективности работы энергосистемы. На первое место выходит прибыль как производителей энергии, так и её потребителей. В качестве критерия эффективности работы рынка целесообразно использовать максимальный выигрыш всех

участников рынка, включая производителей и потребителей энергии.

2. Совместный розничный рынок электроэнергии и тепла в России до сих пор не создан. Основная причина — сложные взаимосвязи его субъектов. Экономические отношения субъектов розничного рынка необходимо изучать. Для этого можно использовать предложенную математическую модель работы ТЭЦ на рынке электрической и тепловой энергии. Отличительной особенностью этой модели является то, что она не делит общие затраты на топливо ТЭЦ между электроэнергией и теплом, они разделяются сами по критерию достижения максимальной эффективности работы рынка.

3. Значение полезности электрической и тепловой энергии предлагается оценивать удельным значением добавленной стоимости выпускаемого потребителем товара при покупке им на рынке единицы энергии, используемой в процессе производства данного товара. Перечисленные свойства дают возможность построить кривые спроса потребителей энергии.

4. Обязательное участие на оптовом рынке ТЭЦ привело к тому, что розничные рынки лишились основных поставщиков энергии, поскольку ТЭЦ в соответствии с принятыми правилами обязаны поставлять всю электроэнергию на оптовый рынок. На розничном рынке потребители оказались оторваны от своих основных производителей электрической и тепловой энергии — ТЭЦ. Расчёты показывают, что вывод ТЭЦ на оптовый рынок повышает тарифы на электрическую и тепловую энергию, снижает экономическую эффективность работы субъектов рынка, в том числе и самой ТЭЦ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутовой Г. П. Некоторые итоги вестернизации отечественной электроэнергетики в постсоветский период // Энергетик. 2014. № 1. С. 2 – 10.
2. Мищеряков С. В., Кутовой Г. П. О преобразовании территориальных электросетевых комплексов в рамках субъектов Российской Федерации в торговые платформы конкурентных розничных рынков электроэнергии (мощности) // Энергетик. 2021. № 11. С. 30 – 33.
3. Стофт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии. Пер. с англ. — М.: Мир, 2006. — 623 с., ил.
4. Микулич Г. В. Решение задач топливоиспользования с применением зависимости расходов топлива на совокупную продукцию ТЭЦ // Вести в электроэнергетике. 2008. № 4. С. 43 – 46.
5. Молодюк В. В. Математическая модель работы ТЭЦ на рынке электроэнергии и тепла // Энергетик. 2014. № 11. С. 12 – 16.

Таблица 3

Показатель	Значение показателя при работе ТЭЦ	
	на розничном рынке	на оптовом рынке
Электрическая нагрузка потребителей, МВт	178	164
Получение электроэнергии с оптового рынка, МВт·ч/ч, всего	56	164
в том числе:		
– электроэнергии ТЭЦ	0	104
– электроэнергии КЭС	56	60
Выручка от продажи электроэнергии с оптового рынка, тыс. руб/ч, всего	124	387
в том числе:		
– КЭС	124	142
– ТЭЦ	0	245
Выигрыш потребителей, тыс. руб/ч, всего	266	213
в том числе:		
– электрической энергии, $\Phi_{ээ}$	159	135
– тепловой энергии, $\Phi_{тэ}$	107	78
Выигрыш производителей, тыс. руб/ч, всего	385	364
в том числе:		
– ТЭЦ, $\Phi_{ТЭЦ}$	243	199
– КЭС, $\Phi_{КЭС}$	61	70
– котельной, $\Phi_{кот}$	81	95
<b>Выигрыш энергосистемы <math>\Phi</math>, тыс. руб/ч</b>	<b>651</b>	<b>577</b>