

УДК 330.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА РОЗНИЧНОМ РЫНКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ КОНКУРЕНЦИИ МЕЖДУ ЭНЕРГОСНАБЖАЮЩИМИ КОМПАНИЯМИ И БЕЗ

Н.И. Айзенберг

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 130
E-mail: aizenberg.nata@gmail.com

Е.В. Сташкевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 83
E-mail: evstashkevich@yandex.ru

Ключевые слова: активный потребитель, электроснабжающая компания, координация взаимодействия, теория контрактов, модель неблагоприятного отбора.

Аннотация: Рассматривается задача координации взаимодействия разных типов потребителей и электроснабжающей компании (ЭСК) в условиях ее монополии и конкуренции с другими ЭСК. Предложена методика формирования меню тарифов для оптимизации графиков электропотребления разных типов потребителей. Протестировано предложенное на сегодняшний день российским законодательством меню тарифов и показана возможная неэффективность работы существующей схемы.

1. Введение

Доклад посвящен моделированию взаимоотношений потребителя и электроснабжающей компании (ЭСК) на розничном рынке электроэнергии. Нас будет интересовать задача возможности управления потреблением со стороны спроса (demand-side management - DSM), связанная развитием smart grid. Такие постановки предполагают согласование интересов нескольких экономических агентов и для их решения используется теория игр [1-3].

Классические схемы DSM, включая «умное ценообразование» (smart pricing - SP) ориентированы на взаимодействие между ЭСК и каждым отдельным пользователем [4, 5]. Суть SP заключается в том, чтобы предоставлять денежные стимулы для пользователей добровольно менять свое потребление и оптимизировать нагрузку на сеть. При этом цена у потребителя будет зависеть не только от изменения собственной нагрузки, но и от изменения потребления других пользователей. В результате решения задачи поиска равновесия [4] предлагается единый для всех тариф, ориентированный на агрегированную экономию всех подключенных потребителей. С другой стороны, сегодня

распространена практика разработки нескольких видов тарифов. Тогда потребитель на рынке может выбирать разные способы ценообразования из нескольких предложенных ЭСК [2]. Мы ставим задачу назначить цены в нескольких тарифах так, чтобы каждый потребитель выбрал «свой», отличный от других тариф.

Потребитель описывается функцией спроса, которая может быть эластичной в зависимости от набора имеющихся у него приборов. Кроме того, потребитель может обладать неполной рациональностью. Это означает то, что он может игнорировать возможность сдвига нагрузки и получения выигрыша в оплате, если этот выигрыш мал. Способы учета специфики поведения при неполной рациональности в моделях электроэнергетических рынков различны [6, 7, 8]. В нашей работе реализуется вариант неполной рациональности в упрощенном виде, считая, что потребитель будет выбирать предложенный выгодный вариант лишь с некоторой вероятностью.

В представляемом докладе решается задача координации суточных режимов с использованием одного из игровых подходов - теории контрактов [9]. Потребителей мы разделяем в соответствии с их желанием и возможностью регулировать свое пиковое потребление (в некотором смысле степенью рациональности действий). Итогом решения задачи должны стать стратегии ЭСК (тарифы), стимулирующие потребителей к рациональным действиям и согласованные между разными типами потребителей. Наша цель сформировать разделяющее равновесие, что является новизной исследования. Для выпуклой функции издержек ЭСК и вогнутых функций полезности потребителей решение поставленной задачи (равновесие Нэша) существует и единственно. Рассматриваются различные варианты конфигурации рынка.

- 1). Электроснабжающая компания (ритейлер) действует на рынке одна и обслуживает несколько различных типов потребителей. При этом розничные сети принадлежат самой компании.
- 2). ЭСК монополист, но сети действуют самостоятельно. В этом случае они выделены в отдельного рыночного агента и ЭСК должна будет заключать договоры на передачу.
- 3). Существует предложение от нескольких возможных ритейлеров и потребитель может выбирать компанию-поставщика. Т.е существует конкуренция между ЭСК.

В России конкуренция на розничном рынке развита слабо, последствия введения конкуренции до конца не ясны, поэтому моделирование розничного взаимодействия разных конфигураций актуально.

2. Модель неблагоприятного отбора для монопольной ЭСК при условии, что сети принадлежат компании

Имеется несколько типов потребителей, обладающих различными возможностями по регулированию собственной нагрузкой. В конце этого параграфа мы обсудим как можно различать типы. Θ – множество K типов потребителей, каждый обозначим через $\theta_k \in \Theta$. При формулировке задачи мы предполагаем, что количество типов потребителей совпадает с количеством потребителей. Пусть некоторый потребитель k относится типу θ_k , ($k = \overline{1, K}$). Он будет описываться функцией спроса, определяемой через функцию полезности $u_k(q_{kt}^{\theta_k})$, $q_{kt}^{\theta_k}$ - нагрузка k -го потребителя в период t . Суммарная полезность рассчитывается, как сумма полезностей за все периоды $t = \overline{1, T}$: $\sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\theta_k})$.

Каждый потребитель имеет издержки, связанные с оплатой за полученную электро-

энергию R^{θ_k} . Задача, которую решает каждый θ_k -ый потребитель - максимизация выигрыша от покупки электроэнергии:

$$\sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\theta_k}) - R^{\theta_k} \rightarrow \max_q, k = \overline{1, K}.$$

ЭСО назначает тариф R^{θ_k} для θ_k -го типа потребителей в соответствии с функцией своих издержек $C(q_{kt}^{\theta_k})$ в определенный период t , включая издержки на содержание сети. Основной задачей электроснабжающей организации является максимизация прибыли:

$$\pi = \sum_{k=1}^K \left(R^{\theta_k} - \sum_{t=1}^T C(q_{kt}^{\theta_k}) \right) \rightarrow \max_{R^{\theta_k}}.$$

Задача состоит в том, чтобы каждый потребитель выбирал «свой» тариф из набора предложенного ЭСО. При этом необходимо избежать ситуации, когда все типы потребителей выбирают одинаковый тариф. Это не выгодно ЭСО, так как часть стимулов, заложенных в ценах, не работает. Такая ситуация в теории контрактов [9] называется «неблагоприятный отбор».

Чтобы избежать ситуации «неблагоприятного отбора» формируют два типа ограничений, которые задают интервал, удовлетворяющий критериям разделяющего равновесия. Во-первых, оба типа не отказываются от потребления по предложенным тарифам (условие участия). Во-вторых, выбирают разные тарифы (условие согласования типов).

Условие участия для каждого типа потребителя основано на некоторой альтернативной полезности,

$$\bar{U}_k = u_k \left(\sum_{t=1}^T q_{kt}^{\theta_k} \right) - R_L^{\theta_k}.$$

Условие участия (IR) для некоторого потребителя k типа θ_k : полезность $U_k^{\theta_k}$ от выбора тарифа R^{θ_k} , разработанного ЭСО для данного типа, должна быть больше его альтернативной \bar{U}_k полезности, которую получит потребитель, не участвуя в выборе оптимальной схемы электропотребления. Второе условие - согласованности по стимулам (IC) - связано с выбором «своего» тарифа. Полезность $U_k^{\theta_k}$ потребителя k от выбора тарифа R^{θ_k} , разработанного ЭСО специально для данного типа:

$$U_k^{\theta_k} = \sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\theta_k}) - R^{\theta_k},$$

должна быть больше полезности $U_k^{\theta_l}$ от выбора тарифа R^{θ_l} , который ЭСО разрабатывала для другого типа θ_l .

$$U_k^{\theta_l} = \sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\theta_l}) - R^{\theta_l}.$$

Тогда задача определения набора тарифов для нескольких типов потребителей будет выглядеть так:

$$(1) \quad \begin{cases} \pi = \sum_{k=1}^K \gamma^k \left(R^{\theta_k} - \sum_{t=1}^T C(q_{kt}^{\theta_k}) \right) \rightarrow \max_{R^{\theta_k}, q_{kt}^{\theta_k}}; \\ U_k^{\theta_k} \geq \bar{U}_k, \quad \forall k \in [1, K], \theta_k \in \Theta; \\ U_k^{\theta_k} \geq U_k^{\theta_l}, \quad \forall k, l \in [1, K], \theta_k, \theta_l \in \Theta; \\ \sum_k \gamma^k = 1; \quad q_{kt}^{\theta_k} \geq 0, q_{kt}^{\theta_l} \geq 0; R^{\theta_k} \geq 0, R^{\theta_l} \geq 0, \gamma^k > 0. \end{cases}$$

Решением задачи (1) должно стать нахождение эффективных тарифов, выгодных потребителю и ЭСО. При этом решается общеизвестная проблема DSM возможного равномерного распределения нагрузки между временными интервалами и задача назначения для каждого типа потребителей своего стимулирующего тарифа. ЭСО не может «навязывать» тариф потребителю, который просто выбирает выгодный.

В нашей работе оптимизация графика связана с сокращением пиковой нагрузки (перенесением части на непиковое время). В этом случае ЭСО экономит на издержках, а потребитель снижает расход на оплату электроэнергии. В работе обсуждаются ценовые стимулы к оптимизации графика: предложения по сокращению пиковой нагрузки в обмен на снижение цен в тарифе.

3. Модель неблагоприятного отбора для ситуации конкуренции между ЭСК при условии, что сети принадлежат компании

Присутствие нескольких компаний на рынке дает потребителю возможность выбрать не только вид тарифа, но и компанию, которая его будет обслуживать. В этом случае будет выбран тариф, предлагающий электроэнергию по самой низкой цене. Это возможно из-за того, что электроэнергия товар однородный¹. Моделирование рассматриваемой ситуации можно осуществить с помощью моделей конкуренции по Бертрана. В результате решения задачи потребители выбирают эффективные для себя тарифы, ЭСК имеет нулевую (или нормальную) прибыль, а тариф одного типа потребителя должен отличаться от тарифа другого. Все эти условия трансформируют задачу (1)

$$(2) \quad \begin{cases} \sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\theta}) - R^{\theta}(q_k^{\theta}) \rightarrow \max_q, \quad k = \bar{1}, \bar{K}, \forall \theta \in \Theta \\ \pi \equiv \sum_{\theta \in \Theta} \gamma^{\theta} \left(R^{\theta}(q_k^{\theta}) - \sum_{t=1}^T C \left(\sum_{k=1}^{m^{\theta}} q_{kt}^{\theta} \right) \right) = 0; \\ \sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\theta}) - R^{\theta}(q_k^{\theta}) \geq \sum_{t=1}^T u_k(q_{kt}^{\circ}) - R^{\circ}(q_k^{\circ}), \quad k, j \in [1, K], \forall \theta, \circ \in \Theta; \\ \sum_{\theta \in \Theta} \gamma^{\theta} = 1; \quad q_{kt}^{\theta} \geq 0, q_{kt}^{\circ} \geq 0; R^{\theta}(q_k^{\theta}) \geq 0, R^{\circ}(q_k^{\circ}) \geq 0, \gamma^{\theta} > 0. \end{cases}$$

В докладе рассмотрены модели (1) и (2) при условии существования еще одного экономического агента - сетевых компаний, которые доставляют электроэнергию до потребителя. В этом сегменте конкуренция не возможна. Для рассматриваемых моделей. Электросети будут иметь монопольные характеристики.

¹ Вопросы разной надежности обеспечения электроэнергией мы здесь не рассматриваем.

Все модели будут проиллюстрированы на примере снабжения одного из городских районов г. Иркутска. Оценены положительные и отрицательные стороны введения той или иной для российского рынка.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-06-00071.

Список литературы

1. Pettersen E., Philpott A.B., Wallace S.W. An electricity market game between consumers, retailers and network operators // *Decision support systems*. 2005. Vol. 40, No. 3. P. 427-438.
2. Kirschen S. Demand-side view of electricity markets // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003. Vol. 18, No. 2. P. 520-527.
3. Volkova I.O., Gubko M.V., Salnikova E.A. Active consumer: the optimization problem of electricity consumption and self-generation // *Control Sciences*. 2013. № 6. P. 53-61.
4. Mohsenian-Rad H., Wong V.W., Jatskevich J., Schober R., Leon-Garcia A., Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010. Vol. 1, No. 3. P. 320-331.
5. Deng R., Yang Z., Chen J., Rahbari-Asr N., Chow M.-Y. Residential energy consumption scheduling: A coupled-constraint game approach // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014. Vol. 5, No. 3. P. 722-731.
6. Breukers S. C., Heiskanen E., Brohmann B., Mourik R. M., Feenstra C. F. Connecting research to practice to improve energy demand-side management (DSM) // *Energy*. 2011. Vol. 36, No. 4. P. 2176-2185.
7. Sanstad A. H., Howarth R. B. Consumer rationality and energy efficiency // *Proceedings of the ACEEE*. 1994. No. 1. P. 175-1.183.
8. Dyer I., Carlos J. F. Consumers' bounded rationality: the case of competitive energy markets // *Systems Research and Behavioral Science*. 2004. Vol. 21, No. 4. P. 373-389.
9. Bolton P., Dewatripont M. *Contract theory*. MIT Press, 2005. 717 p.