

УДК 621.311

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖАЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ И АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Воденников Д. А., зам. председателя Правления –
главный инженер ПАО «ФСК ЕЭС», г. Москва

Предложено решение задачи координации взаимодействия ЭСО и потребителей при регулировании суточных графиков нагрузки. Эффективность решения задачи демонстрируется на примере двух типов потребителей в разных условиях: в регионах с низкими и высокими тарифами на электроэнергию.

Ключевые слова: графики нагрузки потребителей, тарифное регулирование, оптимизация электропотребления, электроснабжающая организация, координация, теория контрактов.

THE INTERACTION OF THE ELECTRICITY SUPPLY COMPANY AND THE CONSUMER IN ENERGY MANAGEMENT

Vodennikov D. A., deputy chairman of the management Board –
chief engineer of JSC "FGC UES", Moscow

The solution of the problem of coordination of interaction between ESS and consumers in the regulation of daily load schedules is proposed. The efficiency of solving the problem is demonstrated by the example of two types of consumers in different conditions: in regions with low and high electricity tariffs.

Keywords: schedules of consumers, tariff regulation, optimisation of power consumption, the electricity supplying organization, coordination, and contract theory.

В последнее время в связи с появлением современных высокоскоростных средств измерения, передачи, преобразования и отображения информации о текущей нагрузке и формирующихся в реальном времени ценах на электроэнергию реализуются новые возможности активного поведения потребителей при управлении собственным электропотреблением на основе рыночных механизмов [1–3 и др.].

Использование рыночных механизмов и развитие информационно-комму-

никационных технологий стимулирует активное поведение и другого субъекта процесса электроснабжения – ЭСО, у которой появляются возможности путем формирования ценовых меню в темпе процесса побуждать потребителей к активному управлению собственным электропотреблением [1, 2, 4]. Взаимодействие ЭСО и потребителей требует координации режимов их работы с учетом несовпадающих интересов этих субъектов отношений. В работе представлены результаты использования

для решения задачи координации одной из разновидностей игровых методов – теории контрактов [5]. В отличие от [6], в данной работе в иллюстрационном примере рассматривается случай наличия у потребителя установок распределенной генерации (РГ).

МОДЕЛЬ КООРДИНАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭСО И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Пусть потребитель электрической энергии (А) планирует за рассматриваемый период купить определенное количество электроэнергии. Учитывая интересы потребителя, функция полезности для него представляется выражением (1).

$$U = - \left(\sum_{k=1}^K C_k + \gamma \right), \quad (1)$$

где: C – затраты потребителя на покупку электроэнергии или ее выработки собственными источниками;

K – количество интервалов рассматриваемого периода (сутки);

γ – возможные затраты на оптимизацию суточного графика нагрузки.

ЭСО – монополист на розничном рынке электроэнергии. Под ее полезностью понимается прибыль от продажи электроэнергии потребителю, которая определяется по-разному в зависимости от выбранного потребителем тарифа. При линейном тарифе прибыль определится по выражению (2).

$$\Delta = \varphi_s - \varphi_b = C_L \sum_{k=1}^K W_k - \varphi_b. \quad (2)$$

При дифференцированном по зонам суток тарифе прибыль определится в соответствии с выражением (3).

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_b = \sum_{t=1}^T C_L \sum_{k \in K^t} W_k - \varphi_b. \quad (3)$$

При двухставочном тарифе – в соответствии с выражением (4).

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_b = C_p P_{\max} + \sum_{k=1}^K C_L W_k - \varphi_b, \quad (4)$$

где: φ_s – стоимость продаваемой электроэнергии и мощности потребителю;

φ_b – стоимость покупаемой на оптовом рынке и мощности ЭСО;

$C_p, C_L, t \in T$ – тарифы на мощность и электроэнергию, продаваемые потребителю;

T – количество тарифных зон в течение суток;

K^t – количество интервалов в зоне.

Примем, что потребитель А может выступать в качестве АП. ЭСО не владеет полной информацией о типе потребителя и предлагает ему на выбор: f – дифференцированный по зонам суток тариф; γ – линейный тариф; z – двухставочный тариф. Линейный тариф альтернативный, на него потребитель будет согласен, если выгода от перехода на иные тарифы будет незначительная. Условие участия для А в данном случае будет означать, что он согласен предпринимать некоторые действия, сокращающие пиковую нагрузку, а, следовательно, снижающие затраты на покупку электроэнергии. Например, А может сдвинуть часть пиковой нагрузки на непиковую зону суток или загрузить собственные установки РГ, если их эксплуатация будет дешевле, чем покупка электроэнергии из сети.

Примем, что ЭСО для покрытия пиковой зоны графика нагрузки потребителя может купить на оптовом рынке пиковую электроэнергию по более высокой цене, чем базовую. При этом ЭСО заинтересована за счет ценового механизма предложить АП снизить пиковое потребление оптимизацией его суточного графика нагрузки, чтобы избежать дополнительных затрат. В этом случае в выражениях (2), (3) и (4) имеем:

$$\varphi_b = \varphi_{bb} + \varphi_{bp}, \quad (5)$$

где: φ_{bb} и φ_{bp} – стоимости базовой и пиковой электроэнергии, покупаемой на оптовом рынке.

Следует отметить, что дефицит пиковой электроэнергии может быть ликвидирован разным составом А и соответствующей каждому из них величиной

суммарных издержек. Также следует учитывать то, что А будут охотнее производить оптимизацию собственного графика нагрузки в случае, если к ним будет применено дополнительное стимулирование, например, путем предоставления скидки по выбранному ими тарифу.

В общем случае сформулированная задача может быть преобразована к задаче математического программирования поиска равновесия Нэша, где ЭСО максимизирует прибыль, получаемую от электроснабжения потребителей:

$$\Delta\varphi(\varphi_s^A, \varphi_b^A) \rightarrow \max, \quad (6)$$

при условии, что потребители действуют по критерию минимизации расходов на электроэнергию.

ИЛЛЮСТРАЦИОННЫЙ ПРИМЕР

Рассматривается система электроснабжения потребителей кампуса технического университета. Всю совокупность потребителей кампуса представляют два эквивалентных потребителя: A_1 (комбинат питания, общежития) и A_2 (поликлиника и санаторий-профилакторий). Анализ показал, что у A_1 в состав управляемой нагрузки можно включить оборудование общей мощностью 360 кВт, при этом затраты, связанные с изменением режима работы A_1 , не приведут к существенным дополнительным расходам, поэтому далее эти затраты не учитываются (в (1) $\gamma_k = 0$

для всех интервалов $k \in \overline{1, K}$). Потребитель A_2 предусматривает график работы, который не подлежит изменению. В качестве примера рассмотрим случай, когда у ЭСО фактическое потребление электроэнергии превышает плановое (рис. 1). Образовавшийся объем отклонения обозначим – W_d . Данная ситуация может возникнуть в результате неспрогнозированного роста электропотребления. Имеются три выхода из создавшейся ситуации: 1) ЭСО может купить недостающую электроэнергию с оптового рынка, но по повышенному тарифу; 2) потребитель может загрузить собственные установки РГ; 3) ЭСО справляется с ситуацией за счет стимулирования управления нагрузкой АП.

Интерес представляет сочетание второго и третьего вариантов, которое может сложиться при некоторых условиях. Пусть затраты на выработку электроэнергии РГ меньше его затрат на покупку у ЭСО дорогой пиковой электроэнергии. В этом случае потребитель будет загружать собственную РГ. ЭСО при этом не имеет дополнительного дохода, однако будет стремиться его получить, переориентировав потребителя на покупку пиковой электроэнергии с оптового рынка вместо загрузки РГ. Это будет возможно, если ЭСО предложит потребителю некоторые скидки к тарифам на пиковую электроэнергию, и в результате торгов будет достигнуто оптимальное значение скидки, выгодное и ЭСО, и потребителю.

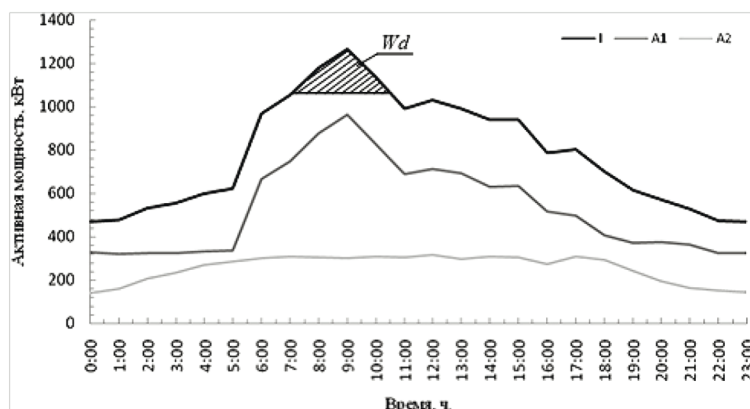


Рис. 1. Суточный график нагрузки кампуса (I) и потребителей, формирующие этот график: A_1 и A_2

А. Процедура торгов

Используя приведенные в [7] тарифы, получим: для A_1 величины суточной платы $y = 45\,663,7$ руб., $f = 66\,855,7$ руб., $z = 56\,865,9$ руб.; для A_2 – $y = 22\,186,9$ руб., $f = 31\,355,02$ руб., $z = 24\,754,9$ руб. Очевидно, что оба потребителя предпочтут у тариф с меньшей платой. В то же время для ЭСО более выгодным является ситуация, когда потребители выбирают f тариф. Общая прибыль для ЭСО от двух потребителей составляет: $y = 3911,5$ руб., $f = 6781,6$ руб. и $z = 4022,2$ руб. соответственно. Поэтому ЭСО будет стимулировать потребителей к переходу на f или z тарифы. Таким образом, ЭСО предлагает потребителям на выбор следующую систему базовых тарифов: y , f , z и тарифов со скидкой при условии, что потребитель оптимизирует потребление в пиковое время: f^* , z^* . Последние тарифы формируются в результате торгов. В торги с ЭСО соглашается вступить A_1 . Торги начинаются с максимальной цены, предложенной ЭСО, с последующим уменьшением величины сбытовой надбавки на каждые 2% на электроэнергию по f и z тарифам, на мощность по z тарифу. При этом ЭСО сравнивает свою итоговую прибыль, получаемую в процессе устранения W_d при участии АП, с прибылью, получаемой при покупке пиковой электроэнергии на оптовом рынке. Так, стоимость привлекаемой пиковой электроэнергии (φ_{bp}) увеличена на 10% от средней базовой

стоимости электроэнергии (φ_{bb}) на оптовом рынке в часы максимума нагрузок [7]. A_1 согласился использовать весь свой потенциал по регулированию собственного графика нагрузки и выбрал торги по z тарифу, т. к. плата по нему ниже, чем по f тарифу. Оценка показывает, что полностью справиться с устранением W_d за счет привлечения АП ЭСО не удалось (рис. 2). Результаты торгов с АП приведены в табл. 1.

Примем, что ЭСО не согласна на прибыль меньше 5%. При скидке в 9% по z тарифу прибыль ЭСО составила 5,5%, а при скидке в 11% – 4,3%. Для потребителя ситуация противоположна: чем больше ему предоставляется скидка, тем большую прибыль он получает. Окончательно принимается компромиссное решение при скидке ЭСО в 9%. Итоговая прибыль ЭСО от двух потребителей составила 4121,95 руб. Это больше значения прибыли, получаемой ЭСО при покупке пиковой электроэнергии на оптовом рынке: 3911,5 руб.

В. Загрузка потребителем собственных установок РГ

В качестве РГ у A_1 рассмотрим газопоршневую установку номинальной мощностью 315 кВт. Расход газа при номинальной нагрузке равен $84 \text{ н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$. В качестве топлива будем рассматривать природный газ, поставляемый ПАО «Газпром» для Новосибирской области

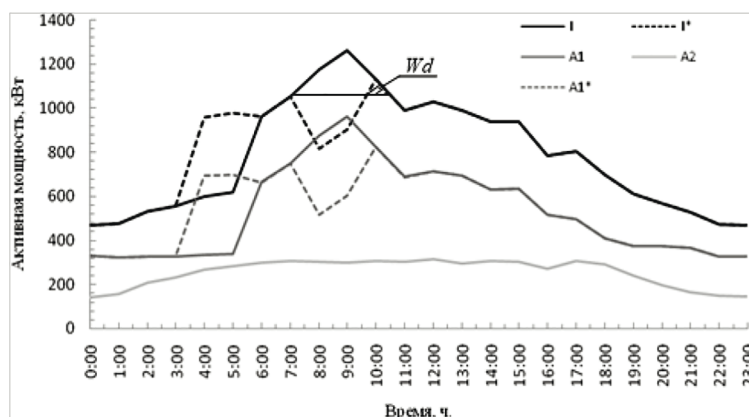


Рис. 2. Суточный график нагрузки кампуса до переноса (I), после переноса (I^*) и потребителя, формирующие этот график: до переноса A_1 , после переноса A_1^* и A_2

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ТОРГОВ ЭСО С ПОТРЕБИТЕЛЕМ A_1

Величина скидки, %	Результаты торгов по двухставочному тарифу z в сравнении с базовым линейным тарифом y	
	выигрыш в прибыли ЭСО, руб.	прибыль A_1 , руб.
Скидка отсутствует и переноса нагрузки нет	1484,07	-11 202,2
Осуществляется перенос нагрузки		
7	265,28	819,67
9	210,44	874,5
11	155,6	929,34
13	100,75	984,17
15	45,9	1039,0
17	-8,93	1093,8

как для ближайшего региона с развитой газовой инфраструктурой. Цена топлива равна 4 руб./м³ [8]. Тогда при работе 3 часа в сутки издержки на выработку электроэнергии РГ потребителя составят 1008 руб. График нагрузки кампуса примет вид, показанный на рис. 3 пунктирной линией.

Благодаря загрузке потребителем РГ, ЭСО удалось полностью избавиться от W_d . Итоговые затраты, которые несет A_1 в данном случае, состоят из затрат на покупку электроэнергии в зависимости от выбранного тарифа (плата A_1), издержек на покупку топлива для загрузки РГ и затрат на установку РГ. Последние определяются в соответствии с выражением (6).

$$Z = e \cdot K + И, \quad (6)$$

где: K – капитальные затраты на установку РГ (равны 6 264 268,0 руб. [9].);

$И$ – ежегодные эксплуатационные издержки (составят 5 % от капиталовложений);

e – коэффициент эффективности инвестиций (за него принята ставка рефинансирования ЦБ РФ, равная 7,75 %).

Тогда при работе 3 часа в сутки затраты на установку РГ составят 2418,8 руб. Получаемая при этом прибыль ЭСО, итоговые затраты A_1 , а также величина прибыли A_1 и выигрыш в прибыли ЭСО приведены в табл. 2. Выигрыш A_1 , полученный в результате торгов с ЭСО при скидке в 9 %,

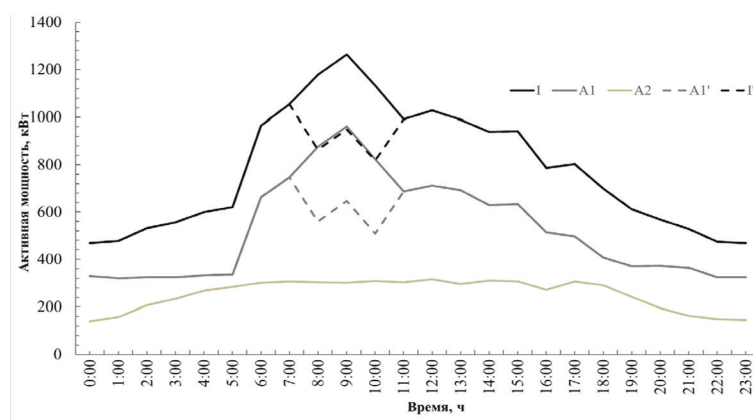


Рис. 3. Суточный график нагрузки кампуса до (I), после (I') загрузки потребителем РГ и потребителя, формирующие этот график: до A_1 , после загрузки РГ A_1^* и A_2

Таблица 2

**ИТОГОВЫЕ ЗАТРАТЫ A_1 , ПОЛУЧАЕМАЯ ПРИ ЭТОМ ПРИБЫЛЬ
И ВЫИГРЫШ В ПРИБЫЛИ ДЛЯ ЭСО**

Линейный тариф			Двухставочный тариф		
Плата A_1 , руб.	Итоговые затраты A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб.	Плата A_1 , руб.	Итоговые затраты A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб.
42 230,5	45 657,3	3963,2	46 746,8	50 173,7	4726,65
Результаты: загрузка A_1 РГ в сравнении с базовым линейным тарифом у					
Прибыль A_1 , руб.	Выигрыш в прибыли ЭСО, руб.	Прибыль A_1 , руб.	Выигрыш в прибыли ЭСО, руб.		
6,4	51,64	-4510,0	815,1		

составил 874,5 руб., а выигрыш, полученный при загрузке РГ – 6,4 руб. Таким образом, A_1 принимает решение осуществлять оптимизацию графика нагрузок и вступать в торги с ЭСО. Дополнительная прибыль для ЭСО в данном случае равна 210,44 руб., что больше значения прибыли, представленной в табл. 2: 51,64 руб.

Вышепредставленные расчеты были проведены для региона с существенно низкими тарифами на электроэнергию (г. Иркутск), аналогичные расчеты проведем для региона с высокими тарифами на электроэнергию (г. Москва). Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

**БАЗОВЫЕ ТАРИФЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ ТОРГОВ,
ЗАГРУЗКА A_1 СОБСТВЕННЫХ УСТАНОВОК РГ**

Базовые тарифы					
Линейный тариф		Дифференциальный тариф		Двухставочный тариф	
Плата A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб.	Плата A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб	Плата A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб
78 749,3	2474,7	94 980,7	3973,0	86 762,5	3044,4
Результаты торгов ЭСО с потребителем A_1 (по тарифу z в сравнении с y)					
Величина скидки		Выигрыш в прибыли ЭСО, руб.		Прибыль A_1 , руб.	
20%		192,2		5291,0	
Загрузка потребителем собственных установок РГ					
Линейный тариф			Двухставочный тариф		
Плата A_1 , руб.	Итоговые затраты A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб.	Плата A_1 , руб.	Итоговые затраты A_1 , руб.	Прибыль ЭСО, руб.
72828,56	76 391,5	3192,8	75 799,8	76 943,9	3433,792
Результаты: загрузка потребителем РГ в сравнении с базовым y					
Прибыль A_1 , руб.		Выигрыш в прибыли ЭСО, руб.		Прибыль A_1 , руб.	
2357,8		718,1		1805,4	
				Выигрыш в прибыли ЭСО, руб.	
				959,1	

Как видно из табл. 3, большую прибыль для A_1 опять составил вариант с оптимизацией графика нагрузки A_1 и нахождения компромиссного решения в процессе торгов с ЭСО: 5291,0 руб. Дополнительная прибыль для ЭСО в данном случае равна 192,2 руб.

В заключение хотелось бы отметить, что в координации суточных режимов систем электроснабжения и потребителей, на базе которых возможно создание механизма взаимоотношений между ЭСО и АП в части устранения дефицитных ситуаций в энергосистеме.

На конкретном примере показано, решение задачи нахождения компромиссного решения между ЭСО и АП в разных условиях: в регионах с низкими и высокими тарифами на электроэнергию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Mohsenian-Rad A.H., Leon-Garcia A.** Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2010. – Vol. 1. – N 2. – Pp. 120–133.
2. **Conejo A.J., Morales J.M., Baringo L.** Real time demand response model // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2010. – Vol. 1. – N 3. – Pp. 236–242.

3. **Степанов В.С., Суслов К.В., Козлова Е.В.** Возможности регулирования собственного режима питания промышленного предприятия и технико-экономические предпосылки их реализации // Промышленная энергетика. – 2013. – № 6. – С. 2–7.

4. **Rahbari-Asr N., Ojha U., Zhang Z., Chow M.-Y.** Incremental welfare consensus algorithm for cooperative distributed generation/demand response in smart grid // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2014. – Vol. 5. – N 6. – Pp. 2836–2845.

5. **Юдкевич М.М., Подколзина Е.А., Рябинина А.Ю.** Основы теории контрактов: модели и задачи. – М.: Высшая школа экономики, 2002. – 352 с.

6. **Айзенберг Н.И., Сташкевич Е.В., Воронин Н.И.** Координация взаимодействия электроснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки // Известия РАН. Энергетика. – 2016. – № 3. – С. 15–25.

7. Официальный сайт ООО «Иркутскэнергосбыт». – Режим доступа: <http://www.sbyt.irkutskenergo.ru/qa/3622.html>

8. Официальный сайт ПАО «Газпром». – Режим доступа: <http://www.gazprom.ru/f/posts/98/377922/2017-07-01-ceny-krome-naselenia.pdf>

9. Коммерческое предложение ОАО «Коломенский завод». – Режим доступа: <http://www.kolomnadiesel.com/>



На правах рекламы

УЛУЧШАЯ КАЧЕСТВО, МЕНЯЕМ МИР

<http://panor.ru/upr>

Научно-практический журнал «Управление качеством» для руководителей производств, специалистов по качеству, стандартизации, сертификации, техническому регулированию и оценке соответствия, а также для учащихся и аспирантов вузов технической направленности.

Журнал «Управление качеством» — энциклопедия знаний в сфере стандартизации, технического регулирования, менеджмента качества. Публикуемые материалы предлагают профессиональный

подход к решению вопросов повышения качества на всех уровнях управления и производства. Одна из главных задач журнала «Управление качеством» — анализ методологии, теории и практики обеспечения качества продукции, применяемых в производстве как отечественными, так и зарубежными компаниями.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ

- Качество в России
- Стандартизация
- Техническое регулирование
- Менеджмент качества
- Качество за рубежом
- Контроль качества
- Теория и практика
- Календарь отраслевых выставок, форумов, конференций на каждый квартал

подписные индексы



Для оформления подписки через редакцию пришлите заявку в произвольной форме по адресу электронной почты podpiska@panor.ru или позвоните по тел. 8 (495) 274-22-22 (многоканальный).