

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ

Возможности регулирования режима собственного электропотребления промышленного предприятия и технико-экономические предпосылки их реализации

Степанов В. С., доктор техн. наук, Суслов К. В., канд. техн. наук, Козлова Е. В., инж.

Иркутский государственный технический университет

Рассмотрены возможности привлечения электроемких предприятий к проектам управления спросом в рыночных условиях. На примере медеплавильного завода описана процедура определения предельных параметров ограничения электропотребления с учетом технологических возможностей оборудования, обусловленных необходимостью выполнения им основных производственных функций. Приведена экономическая оценка условий, при которых предприятие может быть заинтересовано в управлении нагрузкой энергосистемы.

Ключевые слова: график электрических нагрузок, управление нагрузкой, электроэнергетическая система.

Основная особенность электроэнергетических систем (ЭЭС) состоит в том, что объемы производства и потребления электроэнергии в них должны совпадать в каждый момент времени. Это означает, что спрос на электроэнергию должен обеспечиваться электростанциями ЭЭС в строгом соответствии с графиком нагрузки каждого потребителя. Конфигурация суточных графиков конкретных потребителей определяется их функциональным назначением, характером осуществляемых в них технологических процессов. Суточные графики нагрузок ЭЭС складываются из графиков нагрузок отдельных потребителей, которые, как правило, крайне неравномерны. Степень плотности и равномерности графиков оказывает заметное влияние на экономические показатели энергосистем.

Изменение электрических нагрузок потребителей во времени дает возможность существенно уплотнить график нагрузки энергосистемы, что позволяет снизить потребность в генерирующих мощностях, а также текущие издержки производства электроэнергии. В новых экономических условиях уплотнение графика ЭЭС возможно лишь на основе соответствующих договоров энергосистемы с отдельными потребителями электроэнергии (ПЭ) с учетом экономических интересов каждой стороны. Именно так проблема управления спросом решается за рубежом в рам-

ках разработки концепции создания интеллектуальных энергосистем (Smart Grid) [1 – 4]. В ряде стран (Англия, Австралия, США и др.) разработаны и реализуются проекты автоматизированного управления спросом на электроэнергию с целью снижения пиковых нагрузок энергосистем [5, 6]. На основе анализа различных объектов электропотребления распределительные компании выявляют такие электроприемники, которые в совокупности позволяют существенно (до 25 %) снизить пиковую нагрузку. Среди таких электроприемников обычно рассматриваются кондиционеры крупных жилых, коммерческих и административных зданий в городах, электрические водонагреватели, электроприводы насосов в системах орошения и др. После анализа и оптимизации электропотребления компании разрабатывают программы управления спросом на электроэнергию, устанавливают льготные условия, предоставляемые потребителям, согласившимся добровольно в них участвовать.

В нашей стране подобные потребители вероятнее всего не скоро будут привлекаться к управлению спросом в проектах создания интеллектуальных энергосистем. Сейчас в первую очередь необходимо привлекать крупные промышленные предприятия, стимулируя их участие в тех или иных проектах различными экономическими предпочтениями.

Чтобы определить условия, при которых энергосистема готова вовлечь ПЭ в разрешенные различные дефицитные ситуации, а потребители согласятся на это, нужно рассматривать их не изолированно, а как единый комплекс “ЭЭС + ПЭ”. От параметров дефицитной ситуации в энергосистеме зависят значение снижаемой мощности и время ограничения потребителей. Вместе с тем глубина и продолжительность ограничения потребителя определяются его технологическими возможностями, обусловленными необходимостью выполнения им основных производственных функций, т. е. предельными регуляционными возможностями. Они обычно характеризуются следующими параметрами:

регулируемой мощностью N_p^* , МВт, т. е. предельно допустимым значением снижения потребляемой мощности;

предельно допустимым временем τ_p^* , ч, в течение которого может быть отключена регулируемая мощность без срыва суточного производства целевого продукта, выпускаемого данным потребителем (либо полуфабриката, если в роли смежников выступают технологические звенья предприятия);

минимальными дополнительными удельными издержками производства z_d , руб/(кВт·ч), обусловленными деформацией режима его электропотребления.

Параметры для ограничений ПЭ должны соответствовать их регулировочным возможностям. Значение снижаемой по заданию ЭЭС мощности ΔP не должно превышать предельно допустимого значения регулируемой мощности N_p^* , т. е. $\Delta P \leq N_p^*$. Продолжительность ограничения t_0 не должна превышать допустимое время ограничения, т. е. $t_0 \leq \tau_p^*$.

Наконец, недоотпущенная потребителю в период ограничения электроэнергия ΔW_0 , МВт·ч, не должна превышать предельного значения ΔW^* , определяемого наработанным в период провала графика нагрузки ЭЭС запасом продукции (полуфабриката), т. е. $\Delta W_0 \leq \Delta W^*$, где $\Delta W^* = N_p^* \tau_p^*$. В этом случае запас продукции измеряется в единицах электроэнергии, требуемой для ее наработки в бездефицитный период. Он определяется меньшей из двух величин: либо объемом продукции, которая может быть запасена на складе (в накопителе), либо технологическим резервом по производительности N_R , МВт, с помощью которого восполняется продукция, израсходованная

в период дефицита для сохранения графика ее поставки смежникам:

$$\Delta W^* = N_R t_v,$$

где t_v — время восполнения продукции на рассматриваемом предприятии.

Снижаемая мощность у потребителя электроэнергии может изменяться от нуля до предельного значения N_p^* . Текущее значение снижаемой мощности ΔP_0 соответствует требованию ЭЭС. Поскольку сохранение ПЭ своих основных производственных функций достигается за счет сработки запаса готовой продукции или полуфабрикатов из накопителей, то время, в течение которого может быть осуществлено снижение мощности на ΔP_0 , определяется объемом соответствующего запаса

$$t_0 = \Delta W_0 / \Delta P_0.$$

Дополнительные издержки производства, связанные с деформацией графика электропотребления энергоемких потребителей, являются ценой выполнения ими при этом основных производственных функций. Структура издержек включает следующие составляющие:

прямые издержки в период ограничения, например, стоимость перерасходованной электроэнергии, других видов энергии, расходующихся для поддержания технологического процесса в этот период;

издержки, связанные с созданием запаса продукции, расходуемой из накопителя в период снижения нагрузки, — стоимость перерасходованной электроэнергии (в ряде случаев стоимость материалов, сырья) при работе оборудования в измененном (форсированном) режиме;

издержки, обусловленные увеличением износа оборудования вследствие частых пусков и остановов, а также вызванные его перегрузками.

Осуществление компенсации дефицита пиковой мощности в энергосистеме с учетом предельных регулировочных возможностей потребителей электроэнергии представляет собой не что иное, как технически и экономически обоснованное управление режимом электропотребления ЭЭС. Ниже рассмотрена процедура определения регулировочных возможностей конкретного предприятия (металлургического завода).

На рис. 1, а приведена технологическая схема металлургического завода, использующего электропечи. Товарным продуктом явля-

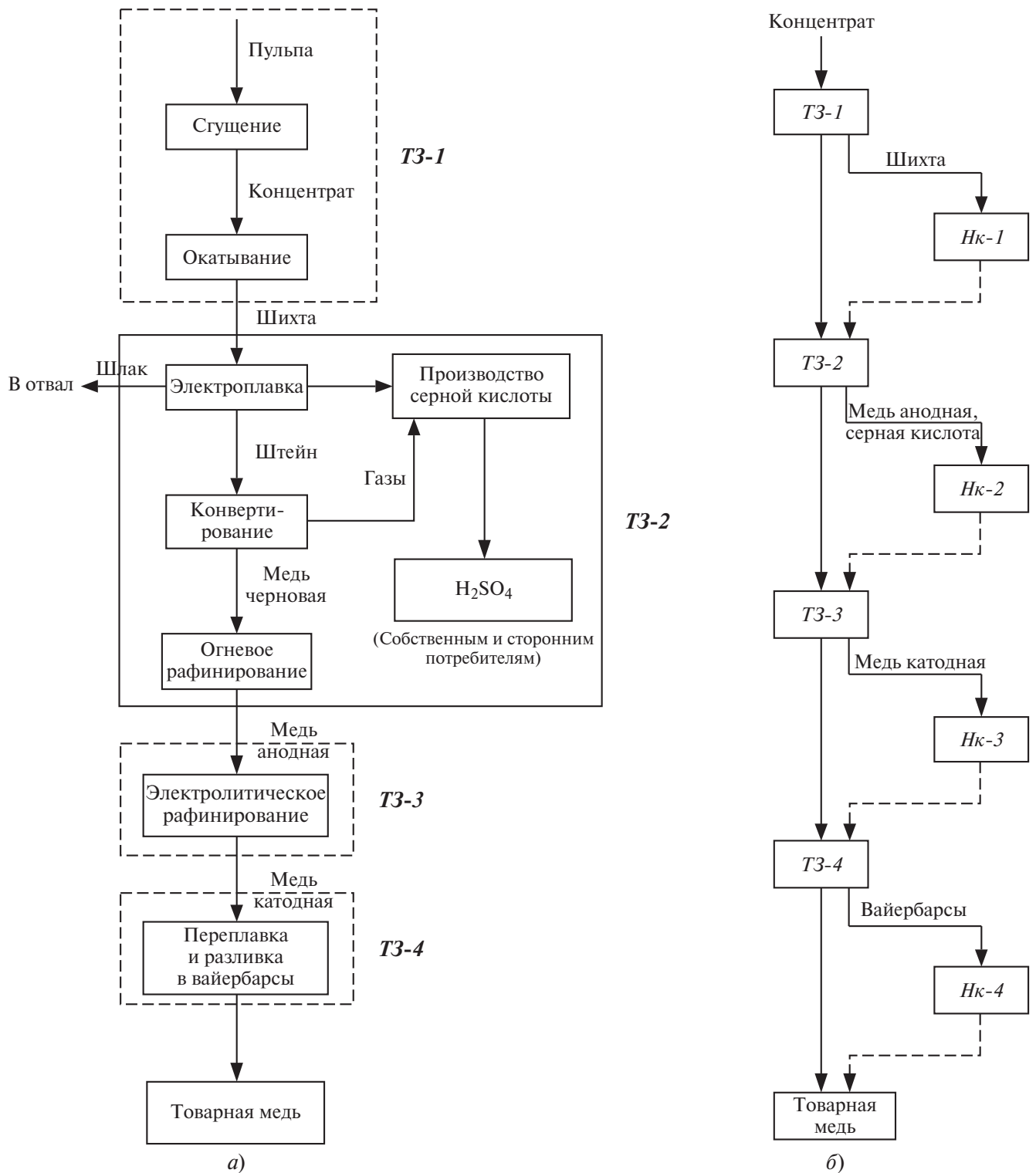


Рис. 1

ются вайербарсы и серная кислота. Сырьем производства служит медный концентрат, поступающий с обогатительных фабрик в виде пульпы.

Для определения состава и параметров управляемой нагрузки предприятия сначала изучаются возможности ограничения электропотребления за счет отключения отдель-

ных звеньев технологической схемы с учетом соответствующего преобразования схемы внутреннего электроснабжения завода. При этом каждое звено должно представлять собой законченный технологический процесс получения промежуточного (или конечного) продукта. Совокупность переделов, необходимых для получения такого продукта, назовем

технологическим звеном (ТЗ), а площадь (емкость), где сохраняется его продукция, — накопителем (Нк). Технологическая схема рассматриваемого завода в формализованном виде показана на рис. 1, б. Она позволяет соответствующим образом сгруппировать электроприемники, обслуживающие каждое технологическое звено, и определить потребляемую мощность каждого звена N_{ii} и мощность завода в целом N_{Σ} при нормальном режиме работы.

В таблице приведена структура электрической нагрузки завода и технологических звеньев. Как видно, нагрузка технологических звеньев ТЗ-2 и ТЗ-3 составляет около 80 % потребляемой мощности завода. Очевидно, что электроприемники этих звеньев более всего подходят для решения задачи управления его нагрузкой. Для выбора звеньев, которые позволяют ограничивать их электропотребление, требуется тщательный анализ осуществляемых в них технологических процессов и обслуживающих их электроприемников.

Процессы подготовки шихты, которые вошли в **первое технологическое звено ТЗ-1**, обслуживают электроприемники, являющиеся электроприводом различных механизмов. Ограничение и даже полный кратковременный перерыв электроснабжения этих процессов не приводит к существенным экономическим последствиям. Возможность иметь запас продукции этого звена (шихты) позволяет при отключении его электроприемников от системы электроснабжения другим ТЗ работать в обычном режиме в течение времени, определяемого объемом накопителя $Нк-1$. Поэтому электроприемники звена ТЗ-1 могут быть включены в программы управления спросом. Однако, как видно из таблицы, потребляемая ими мощность невелика и составляет не более 5 % мощности завода.

Второе технологическое звено ТЗ-2 объединяет технологически жестко связанные переделы. Продукцию этого звена — анодную медь и серную кислоту — также можно накапливать ($Нк-2$). Потребляемая электрическая мощность этого звена является наибольшей и составляет почти 54 % мощности завода. Она складывается из мощности, расходуемой на плавку шихты (технологическая нагрузка), и мощности электроприводов вспомогательных механизмов и агрегатов.

Электроприводы всех вспомогательных механизмов, обслуживающих печи, конверте-

Технологическое звено	Потребитель	Доля потребляемой мощности
ТЗ-1	Отделение сгущения	0,35
	Отделение фильтрации	2,03
	Отделение окатывания	1,67
	Отделение дробления	0,33
	Отделение штабелирования шихты	0,18
	Прочие	0,25
	Итого	4,81
ТЗ-2	Электропечное отделение	48,02
	Конвертерное отделение	0,88
	Сернокислотный цех	4,1
	Анодное отделение	0,95
	Итого	53,95
ТЗ-3	Электролитическое рафинирование	23,23
	Купоросный цех	2,26
	Итого	25,49
ТЗ-4	Переплавка катодной меди	2,41
	Итого	2,41
	Вспомогательные производства	13,34
	Всего:	100,0

ры, разливочные машины, отключению не подлежат, ограничение их электроснабжения также нежелательно. В регулируемую нагрузку этого звена может быть частично включена лишь мощность, расходуемая непосредственно на плавку шихты. Важно отметить, что технология плавки позволяет полное отключение печей на время 2,5 – 3 ч, которого вполне достаточно для прохождения максимума нагрузки в энергосистеме. Таким образом, предельная регулируемая мощность этого звена будет определяться числом работающих на заводе рудно-термических печей n и их номинальной мощностью P_n :

$$N_{r2}^* = nP_n.$$

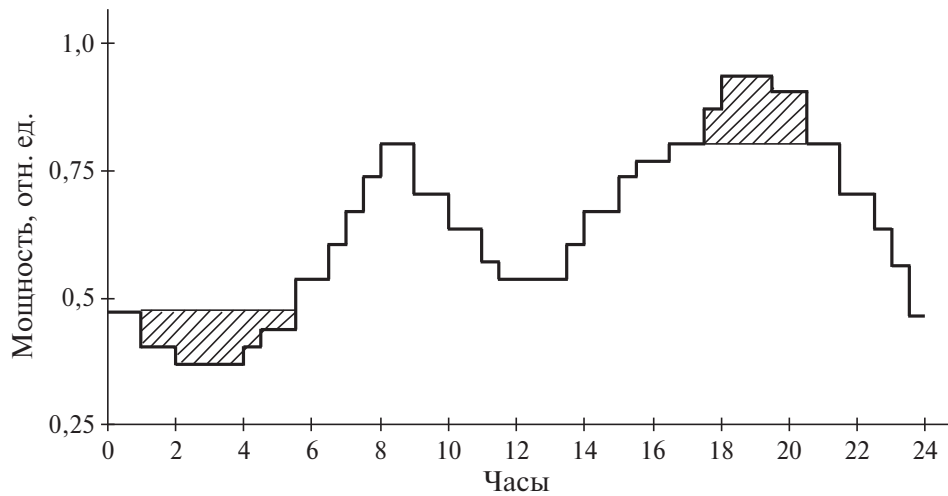


Рис. 2

Предельная продолжительность ограничения мощности этого звена τ_{p2}^* составляет 3 ч.

Третье технологическое звено ТЗ-3 объединяет электроприемники цеха электролитического рафинирования (электролизеры) и купоросного отделения (двигатели привода насосов для перекачки электролита). Кратковременное отключение (2 – 3 ч) электролизеров при подогреве раствора дополнительным теплоисточником не приводит к серьезным экономическим последствиям. Недовыпуск продукции (катодной меди) определяется в основном длительностью отключения ванн. При этом отключать насосы для перекачки подогретого электролита нецелесообразно, поскольку они обеспечивают перемешивание раствора в ваннах, не допуская его расслоения. Предельная регулируемая мощность этого звена определяется числом выпрямительных агрегатов m и их номинальной мощностью P_r :

$$N_{r3}^* = mP_r.$$

Предельная продолжительность ограничения мощности третьего звена τ_{p3}^* также не должна превышать 3 ч.

Четвертое технологическое звено ТЗ-4 включает в себя в основном специальные электропечи для переплавки катодной меди, которые могут быть отключены на время, требуемое для восполнения в бездефицитный период. Однако, как видно из таблицы, потребляемая мощность этого звена невелика (примерно 2 – 2,5 % мощности завода). По-

этому ее включение в состав регулируемой мощности завода N_{Σ}^* вряд ли целесообразно.

Таким образом анализ показывает, что на рассматриваемом предприятии в состав управляемой нагрузки можно включить электроприемники второго и третьего технологических звеньев: рудно-термические печи и электролитные ванны.

Чтобы проанализировать экономическую заинтересованность завода в управлении собственной нагрузкой с целью снижения максимума в энергосистеме, **рассмотрим следующий пример.** Суточный график нагрузки завода в относительных единицах приведен на рис. 2. Максимальная потребляемая мощность в часы прохождения максимума в ЭЭС $P_m = 200$ МВт, число часов использования максимума нагрузки $T_m = 6000$ ч, предельная регулируемая нагрузка $N_{\Sigma}^* = 50$ МВт. Завод рассчитывается с ЭЭС по двухставочному тарифу

$$C_{an} = a_m P_m + b_e W_{an},$$

где $a_m = 4000$ руб/кВт; $b_e = 2$ руб/(кВт · ч); $W_{an} = T_m P_m$.

Отсюда годовая плата завода за потребленную электроэнергию

$$C_{an} = 4000 \cdot 200\,000 + 2(200\,000 \cdot 6000) = 3,2 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Деформация графика нагрузки с целью снижения мощности завода на 50 МВт в часы прохождения максимума в ЭЭС без изменения годового электропотребления позволит предприятию уменьшить плату за электроэнергию при том же тарифе. Это обусловлено снижением платы за мощность $P'_m = 150$ МВт, а также существующей в рыночных условиях

разницей в стоимости электроэнергии, потребляемой в пиковое и внепиковое время.

Ориентируясь на тарифы в США [7], принимаем стоимость электроэнергии, потребляемой в пиковое время, $b_p = 7$ руб/(кВт·ч). Годовое уменьшение электропотребления завода в пиковое время, т. е. количество пиковой электроэнергии, которую он может реализовать на рынке, можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{an}'' &= N_{\Sigma}^* \tau_p^* z = \\ &= 50 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 365 = 54,75 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned}$$

где z — число суток в году.

Тогда плата завода за электроэнергию после деформации графика

$$\begin{aligned} C_{an}' &= a_m P_m' + (b_e W_{an} - b_p W_{an}'') = \\ &= 4000 \cdot 150 \cdot 10^3 + (1,2 \cdot 10^9 \cdot 2 - 54,75 \cdot 10^6) = \\ &= 2,61675 \cdot 10^9 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Годовая экономия (снижение годовой платы за электроэнергию), которую завод может получить вследствие деформации графика своей нагрузки,

$$\begin{aligned} \Delta C_{an} &= C_{an} - C_{an}' = \\ &= 3,2 \cdot 10^9 - 2,61675 \cdot 10^9 = 0,58325 \cdot 10^9 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Однако, чтобы принять решение о целесообразности участия в проекте управления нагрузкой энергосистемы, заводу необходимо оценить суммарные дополнительные затраты C_{ad} , обусловленные деформацией графика собственного электропотребления. Сопоставление значений ΔC_{an} и C_{ad} покажет, целесообразно ли предприятию участвовать в управлении нагрузкой ЭЭС при существующем тарифе на электроэнергию или его необходимо стимулировать к этому, предлагая те или иные льготные тарифы.

Выводы

1. К управлению нагрузкой энергосистем можно привлекать энергоемкие промышленные предприятия, технология которых позволяет осуществлять кратковременные отключения электроснабжения.

2. Выявление регулировочных возможностей таких потребителей требует знания особенно-

стей технологических процессов, режимов работы обслуживающих их электроприемников. Это позволяет соответствующим образом формализовать технологическую схему предприятия, преобразовать внутреннюю схему его электроснабжения и тем самым расширить предельные значения регулируемой мощности и допустимой продолжительности ее ограничения (отключения).

3. Деформация графика нагрузки предприятия с целью снижения максимума в энергосистеме позволяет ему уменьшить плату за потребленную электроэнергию. Вместе с тем она сопряжена с определенными дополнительными издержками, которые обусловлены изменением режима работы предприятия. Поэтому, чтобы решить вопрос об участии в управлении нагрузкой энергосистемы, предприятию необходимо сопоставить уменьшение платы за электроэнергию и суммарные дополнительные затраты, обусловленные деформацией графика его нагрузки.

Список литературы

1. **Ning Zhanng, Luis F. Ochoa, Daniel S. Kirschen.** Investigating the impact of demand side management on residential customers. — IEEE PES ISGT Europe 2011, Manchester, UK, Dec. 5–7, 2011.
2. **Investigating** the effects of dynamic demand side management within intelligent smart energy communities of future decentralized power system / A. Fazeli, E. Christopher, C. M. Johnson and other. — IEEE PES ISGT Europe 2011, Manchester, UK, Dec. 5–7, 2011.
3. **The market-based** methods of load rescheduling of consumers and power system / K. V. Suslov, V. S. Stepanov, E. V. Kozlova, L. M. Chebotnyagin. — 5th Conference on liberalization and modernization of power systems: smart technologies for joint operation of power grid. Irkutsk, Russia, August 6–10, 2010.
4. **Voropai N., Efimov D., Khanaev V.** Demand side management and load control in Russia: Experience and perspective view for the next two decades. — IEEE power and energy society general meeting, 2010.
5. **Management** and control of domestic smart grid technology / A. Molderink, V. Bakker, M. G. C. Bosman and other. — IEEE trans. smart grid, vol. 1, no 2, Sep. 2010.
6. **An approach** of DSM techniques for domestic load management using fuzzy logic / P. Ravibabu, A. Praveen, C. V. Chandra and other. — IEEE International conference of fuzzy systems, Aug. 2009.
7. **California** automated demand response system pilot. — USA, California, 2005.

stepanov@istu.edu