

МНОГОУРОВНЕВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.А. Филимонова

В статье рассмотрены особенности процедуры принятия решений по планированию и управлению электропотреблением технологических процессов металлургического производства, определяющих качество принимаемых решений в многоуровневой структуре предприятия.

Разработан метод разрешения межуровневых противоречий при принятии решений на основе введения агрегированного показателя динамики потребления ресурсов – индекса снижения стоимости потребления электроэнергии. Предложенный показатель позволяет согласовать детализованные представления динамики процессов потребления ресурсов на локальных уровнях отдельных технологических процессов и обобщенные представления на верхнем технико-экономическом уровне.

В целях минимизации производственных расходов в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии в работе предложена методика краткосрочного нормирования и прогнозирования потребления электрической энергии, основанная на интегральной оценке оптимальности графиков электропотребления. Произведена апробация предложенной методики на основе реальных данных электросталеплавильного цеха металлургического предприятия первой ценовой зоны. Изменение расписания работ оборудования электросталеплавильного цеха позволило повысить оптимальность графиков электропотребления и сократить затраты на электрическую энергию на 8,2%.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, прогнозирование, потребление электроэнергии.

MULTILEVEL RESOURCE PLANNING AND LOAD MANAGEMENT OF A METALLURGICAL PLANT

A.A. Filimonova

Decision-making features for resource planning and load management of the metallurgical production processes are considered. Examined features evaluate made decisions in multilevel structure of the enterprise.

A method of resolution of interlevel contradictions in decision-making process based on an aggregate indicator is developed. The offered indicator – the index of power consumption cost reduction –

allows to coordinate detailed representations of resources consumption dynamics at the local level of separate processes and generalized representations at the upper technical and economic level.

For the purposes of cost minimization under time-of-day electricity rate conditions a method of short-term rationing and forecasting of electrical energy consumption is developed. The offered method is founded on integral estimation of power consumption charts efficiency. Evaluation of the method on the real data from arc-furnace melting shop is made. Shift of the equipment operation chart of the arc-furnace melting shop provided an option to reduce electric energy costs by 8.2%.

Keywords: energy efficiency, forecasting, energy consumption.

Введение

По данным Росстата, Челябинская область является энергодефицитным регионом, т.е. для полного удовлетворения потребностей области объемов собственного производства энергетических ресурсов не хватает. Электропотребление Челябинской области в существенной степени определяет промышленное производство, при этом крупнейшими потребителями являются металлургические предприятия. По оценкам Центра по эффективному использованию энергии потенциал возможного энергосбережения в промышленности Челябинской области составляет 20 – 25% годового потребления энергоресурсов, при этом по России данный показатель достигает 35% годового энергопотребления. Вследствие этого, одним из основных направлений хозяйственной политики на промышленных предприятиях региона и РФ в настоящее время является энергосбережение и повышение эффективности использования энергии.

Несмотря на большое количество работ, посвященных снижению энергетических затрат на промышленном предприятии [1-7], системный эффект энергосбережения на многих предприятиях еще не получен. Одной из причин является отсутствие должного учета влияния многоуровневой организационной структуры предприятия на принятие решений по планированию и управлению энергопотреблением технологических процессов. Предлагаемая работа посвящена решению указанной задачи применительно к металлургическим предприятиям.

1. Планирование и управление электропотреблением в многоуровневой структуре металлургического предприятия

Общая схема производственной системы управления электропотреблением представлена на рис. 1.

Здесь *ПлК* – подсистема планирования и контроля; *ОДУ* – оперативно-диспетчерское управление; *АСУ Энергоучет* – подсистема мониторинга текущего потребления энергетических ресурсов; *ПР* – потребители-регуляторы электропотребления; *П_i* – прочие потребители энергоресурсов; *g_{on}* – оперативное управление работой потребителей-регуляторов электропотребления; *P₀(t)* – фактический график электропотребления;.

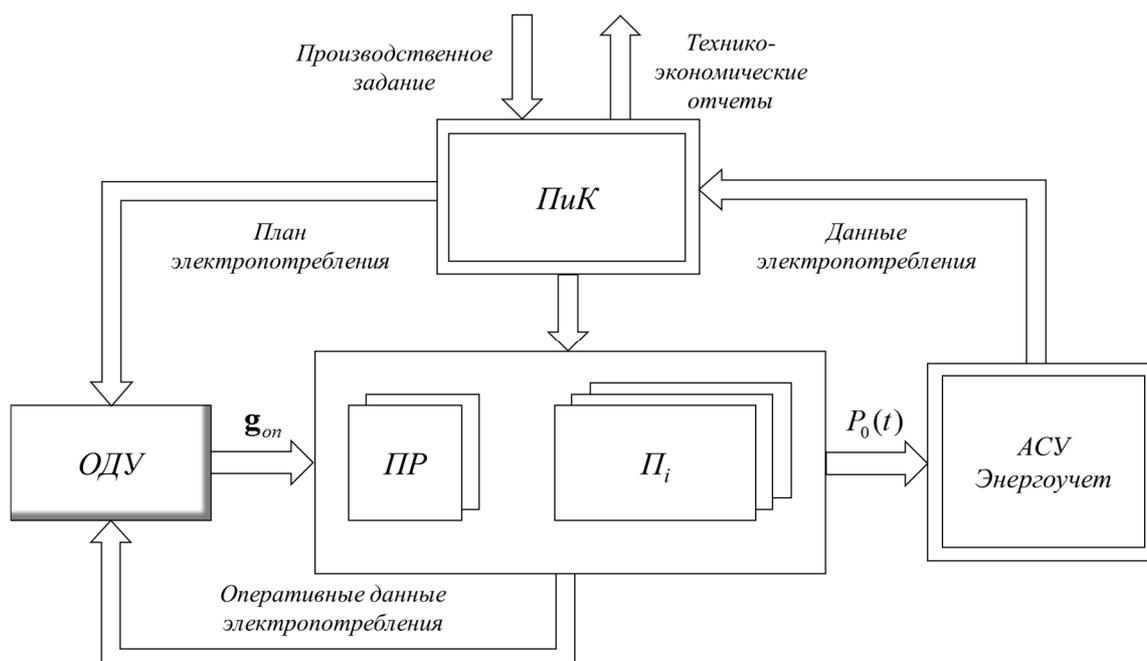


Рис.1. Схема производственной системы управления электропотреблением предприятия

Подсистема планирования и контроля (*ПлК*) находится на верхнем технико-экономическом уровне. На данном уровне определяются плановые задания по объемам электропотребления и энергоемкости производственных участков. В дальнейшем осуществляется контроль их выполнения за установленный период. Назначение обоснованных плановых заданий по объемам энергопотребления и энергоемкости, и оценка их выполнения осуществляются исходя из объективного анализа возможностей технологического оборудования и особенностей его функционирования в существующих производственных условиях.

Вследствие неопределенности электропотребления в масштабах предприятия вводится оперативно-диспетчерское управление электропотреблением (*ОДУ*). Как правило, оперативно-диспетчерское управление осуществляется с использованием специальных потребителей-регуляторов, изменяя электропотребление которых можно добиться управления электропотреблением всего предприятия в заданных пределах.

Одним из основных элементов системы управления энергопотреблением технологического процесса является *АСУ Энергоучет* – подсистема мониторинга текущего потребления энергетических ресурсов. На основе данных *АСУ Энергоучет* и технических отчетов, представляемых подразделениями, формируется информационная база данных об эффективности использования энергетических ресурсов за отчетный период. С использованием информации в представленных техотчетах в подсистеме планирования и контроля осуществляется текущий контроль эффективности использования энергетических ресурсов подразделениями. При этом также используются данные расчетно-нормативной базы.

В целом система управления электропотреблением должна осуществлять последовательную оптимизацию производства по показателям энергоемкости. При этом принятие решений по планированию и управлению электропотреблением технологических процессов в многоуровневой структуре предприятия характеризуется межуровневыми противоречиями, среди которых необходимо выделить:

- несогласованность агрегированных представлений динамики потребления ресурсов на верхнем уровне и высокой степенью детализации представления динамики на нижних уровнях;

- несогласованность между общими оценками объемов потребления электроэнергии предприятия и суммарными локальными оценками объемов потребления электроэнергии на уровне отдельных технологических процессов [8].

Разрешение данных противоречий является необходимым условием достижения системного эффекта энергосбережения и прогресса в данном направлении.

2. Краткосрочное планирование электропотребления

Актуальной задачей нормирования и прогнозирования потребления электрической энергии на металлургических предприятиях является почасовое планирование. Почасовое планирование электропотребления дает технико-экономический эффект на основе следующих факторов:

- 1) более точного контроля потребления электрической энергии, которое позволит выявить места и временные интервалы повышенного использования электрической энергии и оценить резервы снижения объемов потребления электрической энергии;

- 2) снижения затрат на приобретение электрической энергии вследствие переноса электропотребления в более льготный ценовой диапазон.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 определены шесть ценовых категорий для потребителей электроэнергии в зависимости от применяемого в расчетах тарифа. В целях стимулирования предприятий внедрять почасовой учет и почасовое планирование электропотребления с 1 июля 2013 г. для крупных потребителей (с максимальной мощностью не менее 670 кВт) был введен запрет на применение в расчетах первой и второй ценовых категорий, что привело к резкому росту цены электроэнергии для многих предприятий.

Внедрение почасового учета и почасового планирования электропотребления позволит применять в расчетах за потребленную электрическую энергию пятую или шестую ценовую категорию, которые являются наиболее выгодными для потребителя, а также повысить эффективность использования электрооборудования.

Централизованное почасовое нормирование и прогнозирование электропотребления для сложных производственных комплексов с учетом взаимосвязей технологических процессов представляет собой с вычислительной точки зрения чрезвычайно сложную задачу. При централизованных расчетах необходимо знать весьма объемную и

подробную информацию о почасовых графиках электропотребления в зависимости от технологических факторов. Однако знание технологических факторов сложных производственных комплексов сосредоточено на нижних уровнях производственной иерархии. Поэтому точное централизованное решение является практически невыполнимым.

В этой связи для сложных производственных комплексов предлагается децентрализованная процедура почасового нормирования и прогнозирования электропотребления. Процедура основана на том, что на верхнем уровне иерархии расчетов оцениваются интегральные показатели производственных циклов:

- объемы выпуска продукции Π_{ij} ;
- объемы потребляемой электрической энергии W_{ij} ,

где i – номер производственного участка; j – индекс производственного цикла.

С целью планирования экономической эффективности почасовых расписаний потребления электрической энергии для производственных циклов дополнительно вводится новый интегральный показатель – индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$.

Оптимальный график электропотребления должен минимизировать переменную часть покупки электроэнергии. Для того, чтобы оценить степень оптимальности графика электропотребления предлагается ввести критерий – *индекс снижения стоимости потребления электроэнергии* $I_{сн}$, определяемый по соотношению:

$$I_{сн} = \frac{\sum_k p(t_k) u_{\vartheta}(t_k)}{\sum_k p_{\bar{\sigma}}(t_k) u_{\vartheta}(t_k)}, \quad (1)$$

$$p(t_k) = \frac{P(t_k)}{\sum_k P(t_k)}, \quad p_{\bar{\sigma}}(t_k) = \frac{P_{\bar{\sigma}}(t_k)}{\sum_k P_{\bar{\sigma}}(t_k)}, \quad u_{\vartheta}(t_k) = \frac{\Delta\Pi_{\vartheta}(t_k)}{\sum_k \Delta\Pi_{\vartheta}(t_k)},$$

где $\{P(t_k)\}$ – текущий график электропотребления; $\{P_{\bar{\sigma}}(t_k)\}$ – базовый график электропотребления $\Delta\Pi_{\vartheta}(t)$ – переменная часть индекса равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке, которая изменяется по часам в течение суток.

Базовый график электропотребления вводится в качестве пункта отсчета эффективности текущего графика электропотребления. Если текущий график совпадает с базовым графиком, то значение индекса $I_{сн} = 1$. Если текущий график электропотребления снижает стоимость покупки электроэнергии по сравнению с базовым графиком, то $I_{сн} < 1$. Чем меньше величина индекса $I_{сн}$, тем более эффективным является текущий график электропотребления. Безусловный оптимум достигается при равенстве индекса $I_{сн}$ нулю. В этом случае переменная стоимость покупки электроэнергии равняется нулю. И наоборот, если значение индекса $I_{сн}$ больше 1, то текущий график

электропотребления хуже базового графика. Чем выше величина индекса $I_{сн}$, тем выше будет переменная стоимость покупки электроэнергии.

Таким образом, введение нового показателя - индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$, позволяет интегрально оценивать оптимальность графиков электропотребления. Тем самым можно организовать централизованный контроль, планирование и прогнозирование качества локальных графиков электропотребления для производственных участков. Данный показатель является объективным и зависит только от качества составленных графиков электропотребления и формально не зависит от объемов потребления электроэнергии и уровня цен на электроэнергию. Поэтому на основе данного показателя можно оценивать локальное качество работы отдельных производственных участков. Тем самым обеспечивается объективный контроль и управление качеством локального планирования графиков электропотребления на производственных участках.

Целью стратегии управления электропотреблением является минимизация общих эксплуатационных расходов, которые включают в себя затраты на потребленную энергию (постоянный или почасовой тариф), затраты на зарегистрированную пиковую нагрузку, и добавочные эксплуатационные расходы в связи со смещением нагрузок, если таковые имеются.

Целевая функция минимизации месячных производственных расходов:

$$\left(\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N ((W_{kin} \cdot C_k) + (C_{add} \cdot I_{add}) \cdot t) \right) \cdot d + C_M \cdot M \quad (2)$$

с учетом особенностей производства, ограничений по оборудованию, где

I – агрегаты (группа агрегатов);

N – общее число видов производимой продукции

W_{kin} – электроэнергия в кВт·ч, потребленная оборудованием i за k -й временной интервал при производстве продукции n ;

C_k – стоимость электроэнергии за 1 кВт·ч в интервале времени k ;

C_{add} – добавочная стоимость, связанная с деятельностью по управлению электропотреблением на интервале k . I_{add} – переменная, такая что: $I_{add} = 1$ – при осуществлении действий по управлению электропотреблением, $I_{add} = 0$ – в другом случае.

d – число рабочих дней в месяце;

C_M – стоимость пикового потребления за месяц;

M – заявленное пиковое потребление электроэнергии предприятием.

Эффективно спланированный график электропотребления при почасовом тарифе снижает стоимость покупки электроэнергии по сравнению с базовым графиком. Оценка качества планирования графиков электропотребления осуществляется на основе индекса снижения стоимости.

Результатом решения задачи минимизации производственных расходов (2) является оптимальная характеристика при данном объеме выпуска продукции в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии.

3. Опытные расчеты для электросталеплавильного цеха металлургического предприятия

Апробация предложенной методики проводилась на основе данных почасового потребления электрической энергии агрегатами электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны в период за сентябрь 2014 г., а также с учетом индекса равновесных цен на продажу электроэнергии, полученных с сайта компании ОАО «АТС».

Текущий график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха представлен на рис. 2.

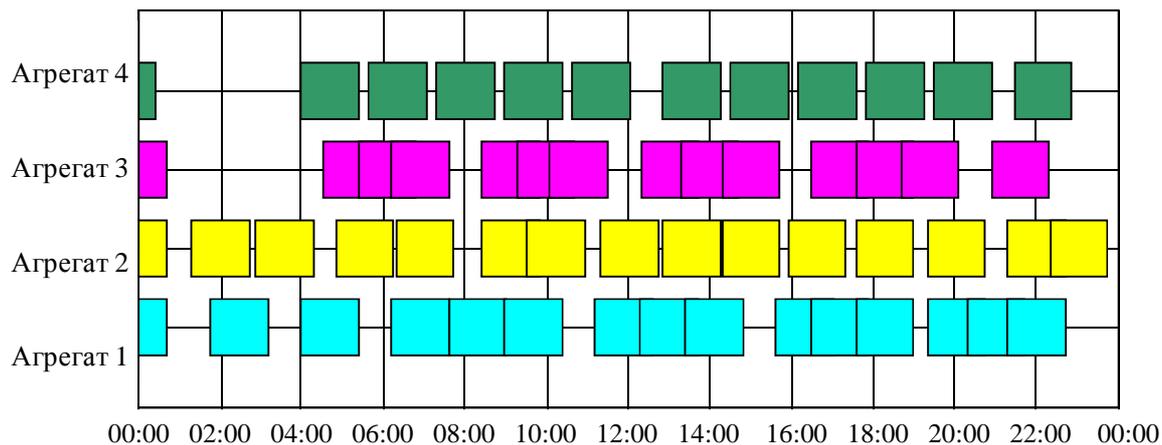


Рис. 2. Почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия

В таблице 1 приведены численные посуточные значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ за сентябрь 2014 года.

Согласно таблице 1, значение индекса снижения стоимости электропотребления $I_{сн}$ для заданных базовых графиков превышает 1.

В целях регулирования графика нагрузки потребитель может перемещать часы работы технологического оборудования в пределах суточного графика. На основе значений индексов снижения стоимости потребления электроэнергии и технологических требований к процессу для каждого базового графика был осуществлен сдвиг в расписании работ оборудования электросталеплавильного цеха.

Таблица 1

Индекс снижения стоимости потребления электроэнергии

№ п/п	Дата	Индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$
1	01.09.2014	1
2	02.09.2014	1,230005
3	08.09.2014	1,10099
4	15.09.2014	1,01747
5	16.09.2014	1,089341
6	23.09.2014	1,1831297

7	29.09.2014	1,356048
8	30.09.2014	1,1686137

При построении оптимального графика почасовой загрузки оборудования была соблюдена технология процесса, в том числе требование по величине перерывов в работе оборудования.

Почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха, построенный путем решения задачи минимизации месячных производственных расходов (2) представлен на рис. 3.

Полученный почасовой график позволяет снизить затраты на приобретение электрической энергии при осуществлении выпуска продукции и других необходимые операции за счет переноса электропотребления в более льготный ценовой диапазон.

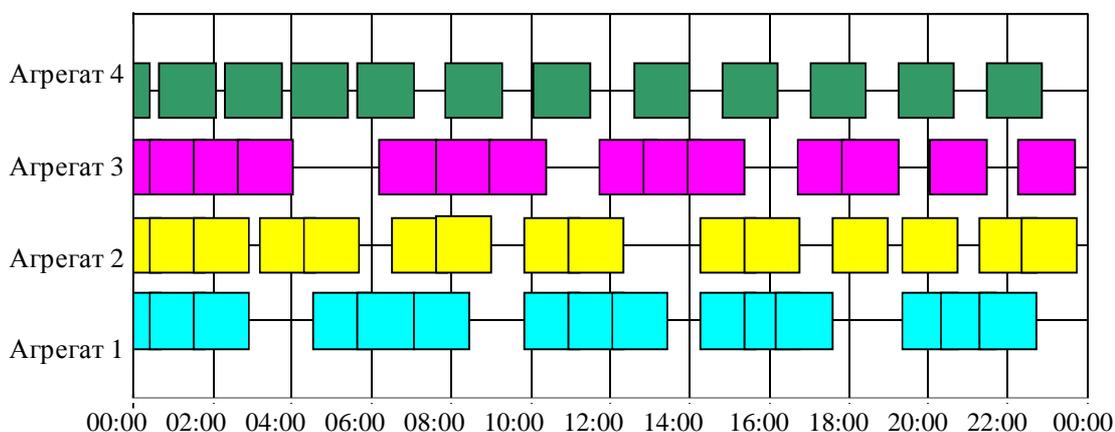


Рис. 3. Оптимальный почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия

На рис. 4 представлено сравнение динамики изменения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии во времени для рассматриваемых вариантов базового графика и базового графика со смещением.

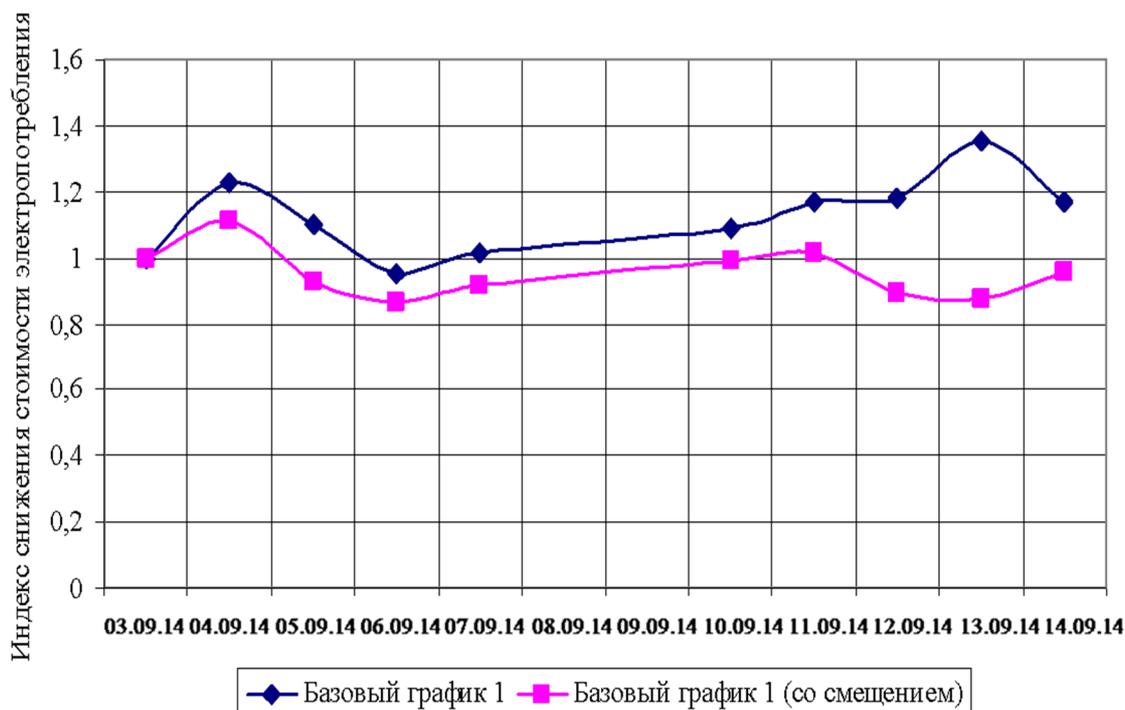


Рис. 4. Сравнение динамики изменения I_{cn} во времени для базового графика и для графика со смещением

Как видно из рис. 4, значение индекса снижения стоимости электропотребления I_{cn} для базовых графиков со смещением уменьшилось по сравнению с первоначальным вариантом.

Таким образом, изменение расписания работ оборудования электросталеплавильного цеха позволило повысить оптимальность графиков электропотребления и сократить затраты на электрическую энергию на 8,2%.

Выводы

1. В работе в целях разрешения межуровневых противоречий при принятии решений введен агрегированный показатель динамики потребления ресурсов – индекс снижения стоимости, позволяющий согласовать детализованные представления динамики процессов потребления ресурсов на локальных уровнях отдельных технологических процессов и обобщенные представления на верхнем технико-экономическом уровне. Предложенный показатель позволяет интегрально оценивать оптимальность графиков электропотребления, а, значит, локальное качество работы отдельных производственных участков.

2. В целях минимизации производственных расходов в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии в работе предложена методика краткосрочного нормирования и прогнозирования потребления электрической энергии, основанная на интегральной оценке оптимальности графиков электропотребления. Экономический эффект от выполнения данной работы состоит в сокращении затрат на электропотребление на 8,2%.

Библиографический список

1. Ashok S. Peak-load Management in Steel Plants. *Applied Energy*. – 2006. – №83. – pp. 413–424.
2. Nolde K., Morari M. Electrical Load Tracking Scheduling of a Steel Plant. *Computers & Chemical Engineering*. – 2010. – №34. – pp. 1899–1903.
3. Niu D., Li J., Li J., Liu D. Middle-long Power Load Forecasting Based on Particle Swarm Optimization. *Computers & Mathematics with Applications*. – 2009. – №57. – pp. 1883–1889.
4. Pielow A., Sioshansi R., Roberts M.C. Modeling Short-run Electricity Demand with Long-term Growth Rates and Consumer Price Elasticity in Commercial and Industrial Sectors. *Energy*. – 2012. – №46. – pp. 1–540.
5. Dordonnat V, Koopman SJ, Ooms M. Dynamic Factors in Periodic Time-varying Regressions with an Application to Hourly Electricity Load Modeling. *Computational Statistics & Data Analysis*. – 2012. – 56. – pp. 3134–3152.
6. Nagi J., Yap K.S., Nagi F., Tiong S.K., Ahmed S.K. A Computational Intelligence Scheme for the Prediction of the Daily Peak Load. *Applied Soft Computing*. – 2011. – №11. – pp. 4773–4788.
7. Lin C.W., Moodie C.L. Hierarchical Production Planning for a Modern Steel Manufacturing System. *International Journal of Production Research*. – 1989. – №27(4) . – pp. 613–628.
8. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Zakharova A.A. Method of Multilevel Rationing and Optimal Forecasting of Volumes of Electric-energy Consumption by an Industrial Enterprise. *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2015. – №48 (6) . – pp. 324–333.

References

1. Ashok S. Peak-load Management in Steel Plants. *Applied Energy*. – 2006. – №83. – pp. 413–424. DOI:10.1016/j.apenergy.2005.05.002
2. Nolde K., Morari M. Electrical Load Tracking Scheduling of a Steel Plant. *Computers & Chemical Engineering*. – 2010. – №34. – pp. 1899–1903. DOI:10.1016/j.compchemeng.2010.01.011
3. Niu D., Li J., Li J., Liu D. Middle-long Power Load Forecasting Based on Particle Swarm Optimization. *Computers & Mathematics with Applications*. – 2009. – №57. – pp. 1883–1889. DOI: 10.1016/j.camwa.2008.10.044
4. Pielow A., Sioshansi R., Roberts M.C. Modeling Short-run Electricity Demand with Long-term Growth Rates and Consumer Price Elasticity in Commercial and Industrial Sectors. *Energy*. – 2012. – №46. – pp. 1–540. DOI: 10.1016/j.energy.2012.07.059
5. Dordonnat V, Koopman SJ, Ooms M. Dynamic Factors in Periodic Time-varying Regressions with an Application to Hourly Electricity Load Modeling. *Computational Statistics & Data Analysis*. – 2012. – 56. – pp. 3134–3152. DOI:10.1016/j.csda.2011.04.002
6. Nagi J., Yap K.S., Nagi F., Tiong S.K., Ahmed S.K. A Computational Intelligence Scheme for the Prediction of the Daily Peak Load. *Applied Soft Computing*. – 2011. – №11. – pp. 4773–4788. DOI: 10.1016/j.asoc.2011.07.005
7. Lin C.W., Moodie C.L. Hierarchical Production Planning for a Modern Steel Manufacturing System. *International Journal of Production Research*. – 1989. – №27(4) . – pp. 613–628.

8. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Zakharova A.A. Method of Multilevel Rationing and Optimal Forecasting of Volumes of Electric-energy Consumption by an Industrial Enterprise. Automatic Control and Computer Sciences. – 2015. – №48 (6) . – pp. 324–333. DOI: 10.3103/S0146411614060054

Филимонова Александра Александровна – аспирант кафедры автоматике и управления ЮУрГУ; al_ekca@mail.ru.

Filimonova Aleksandra Aleksandrovna – postgraduate student Automation and Control Department of SUSU; al_ekca@mail.ru.