

## УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫМИ РАСХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Ю.Н. Колесник, А.В. Иванейчик

Рассмотрен вопрос управления режимами технологического оборудования с кусочно-непрерывными расходными характеристиками электропотребления в условиях двухставочной тарифной системы на электроэнергию.

В настоящее время для управления режимами электропотребления предприятий применяются двухставочный и дифференцированный по зонам суток тарифы, которые вынуждают предприятие платить не только за потребленную электроэнергию, но также за максимальную мощность в период максимумов нагрузки энергосистемы. Этим производится стимулирование потребителей к снижению потребляемой мощности в период максимумов энергосистемы. В связи с этим на предприятиях с кусочно-непрерывными расходными характеристиками [1-2] возникает важная задача по грамотному управлению режимами электропотребления с целью снижения не только расходуемой электроэнергии, но и затрат на ее покупку. При этом возникает вопрос, на какой из характеристик и когда выгоднее работать? Что является более эффективным, снижение до минимума электропотребления в часы максимума (тем самым снижается  $P_{\max}$ ) и работа в остальное время на менее эффективной характеристике, либо максимальное попадание на более эффективную характеристику (уменьшается объем расходуемой электроэнергии)? Все это необходимо рассматривать отдельно в каждом конкретном случае.

Задачей данного исследования является оптимизация режимов электропотребления предприятий с кусочно-непрерывными расходными характеристиками и двухставочными тарифами на электроэнергию с целью уменьшения расхода электроэнергии и затрат на ее приобретение при заданном объеме производства.

Существуют два основных вида кусочно-непрерывных моделей расходных характеристик [3]. На рис. 1 представлена зависимость расхода электроэнергии от объемов выпускаемой продукции (назовем ее зависимостью вида 1), в соответствии с которой, при увеличении объемов производства, происходит резкий скачек электропотребления и оборудование начинает работать на другой, более энергоемкой характеристике II. На рис. 2 представлена зависимость (назовем ее зависимостью вида 2), в соответствии с которой, при увеличении объемов производства, происходит скачкообразное снижение электропотребления и оборудование начинает работать на другой, более энергоэффективной характеристике IV.



Рис. 1. Зависимость расхода электроэнергии от объемов выпускаемой продукции вида 1



Рис. 2. Зависимость расхода электроэнергии от объемов выпускаемой продукции вида 2

Для решения поставленной задачи необходимо представить зависимости расхода электроэнергии от объема выпускаемой продукции в виде функции или модели. В общем случае кусочно-непрерывная модель электропотребления имеет следующий вид [2, 3]:

$$W_i = \begin{cases} a_1 x_i + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_i \leq V_2 \\ a_2 x_i + b_2 & \text{при } V_2 < x_i \leq V_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – объем выпущенной продукции в  $i$ -м часу;  $a_1, b_1, a_2, b_2$  – коэффициенты линейных функций;  $W_i$  – расход электроэнергии в  $i$ -м часу;  $V_1, V_2, V_3$  – объемы производства продукции.

Если принять часовые объемы производства продукции одной смены за  $x_1, x_2 \dots x_8$ , то затраты на покупку электроэнергии по двухставочному тарифу и при заданном объеме производства продукции за смену будут иметь следующий вид:

$$Z = \max \begin{cases} \begin{cases} a_1 x_1 + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_1 \leq V_2 \\ a_2 x_1 + b_2 & \text{при } V_2 < x_1 \leq V_3 \end{cases} \\ \begin{cases} a_1 x_2 + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_2 \leq V_2 \\ a_2 x_2 + b_2 & \text{при } V_2 < x_2 \leq V_3 \end{cases} \\ \begin{cases} a_1 x_3 + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_3 \leq V_2 \\ a_2 x_3 + b_2 & \text{при } V_2 < x_3 \leq V_3 \end{cases} \end{cases} a + \left[ \sum_{i=1}^8 \begin{cases} a_1 x_i + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_i \leq V_2 \\ a_2 x_i + b_2 & \text{при } V_2 < x_i \leq V_3 \end{cases} \right] b. \quad (2)$$

Данное выражение можно упростить, если учесть, что минимум затрат будет достигаться в том случае, когда в период максимумов нагрузок (примем с 8.00 до 11.00) объем выпускаемой продукции, а следовательно и максимальная потребляемая мощность будут одинаковыми ( $x_1 = x_2 = x_3$ ). Тогда затраты на покупку электроэнергии будут иметь следующий вид:

$$Z = \left[ \begin{cases} a_1 x_1 + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_1 \leq V_2 \\ a_2 x_1 + b_2 & \text{при } V_2 < x_1 \leq V_3 \end{cases} \right] a + \left[ \sum_{i=1}^8 \begin{cases} a_1 x_i + b_1 & \text{при } V_1 \leq x_i \leq V_2 \\ a_2 x_i + b_2 & \text{при } V_2 < x_i \leq V_3 \end{cases} \right] b. \quad (3)$$

Рассмотрим все вышеизложенное на примере оптимизации режима работы потребителя за рабочую смену, который рассчитывается за электроэнергию по двухставочному тарифу и характеризуется зависимостью электропотребления вида 1 (см. рис. 1) [4]:

$$W_i = \begin{cases} 0,004x_i + 1,09 & \text{при } 500 \leq x_i \leq 920 \\ 0,004x_i + 3,59 & \text{при } 920 < x_i \leq 1450 \end{cases}. \quad (4)$$

Расчет производился за январь 2007 г. (22 рабочих дня) при заданном объеме производства продукции за смену, равном 8000 у.е. Оптимизация рассчитывалась методами линейного программирования [5].

За исходный режим работы был принят такой график, при котором объем выпускаемой продукции, а, следовательно, и расходуемая электроэнергия были равномерно распределены по всей смене (рис. 3), где пунктирной линией выделено время максимальных нагрузок.

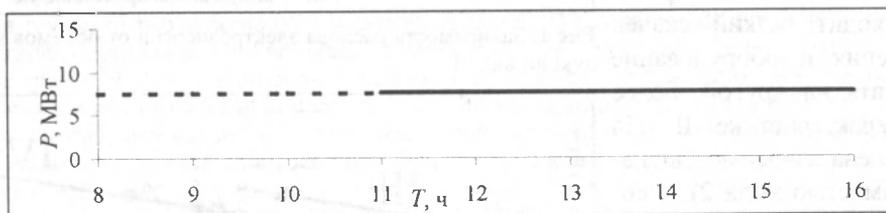


Рис. 3. Исходный режим работы потребителя

При равномерном распределении нагрузки работа на протяжении всей смены осуществляется в т. 5 (см. рис. 1), т.е. на более энергоемкой характеристике II.

Для оптимизации по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии была составлена целевая функция для конкретных условий:

$$Z = \left[ \begin{cases} 0,004x_1 + 1,09 & \text{при } 500 \leq x_1 \leq 920 \\ 0,004x_1 + 3,59 & \text{при } 920 < x_1 \leq 1450 \end{cases} \right] 810,5 + \sum_{i=1}^8 \left[ \begin{cases} 0,004x_i + 1,09 & \text{при } 500 \leq x_i \leq 920 \\ 0,004x_i + 3,59 & \text{при } 920 < x_i \leq 1450 \end{cases} \right] 165,7 \Rightarrow \min . \quad (5)$$

После оптимизации по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии получили график, представленный на рис. 4.

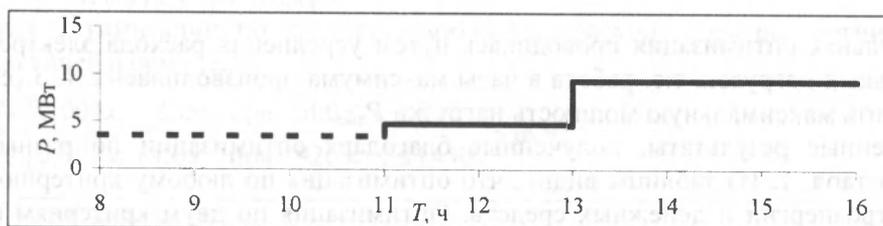


Рис. 4. Режим работы потребителя, оптимизированный по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии

Из графика видно, что для потребителя с заданными расходными характеристиками, более выгодным является *не снижение до минимума объемов выпускаемой продукции в часы максимумов*, а работа в т. 2, (см. рис. 1). В оставшееся время потребитель работает на границах характеристик I и II, в точках 4 и 6 соответственно (см. рис. 1).

Оптимизация режима работы по критерию минимума затрат на электроэнергию выгодна потребителям. Однако, с точки зрения энергосбережения, целесообразно также оптимизировать режимы по критерию минимума расхода электроэнергии [3]:

$$W_{\min} = \sum_{i=1}^8 \left[ \begin{cases} 0,004x_i + 1,09 & \text{при } 500 \leq x_i \leq 920 \\ 0,004x_i + 3,59 & \text{при } 920 < x_i \leq 1450 \end{cases} \right] \Rightarrow \min . \quad (6)$$

Результат оптимизации по критерию минимума электропотребления представлен на рис. 5.

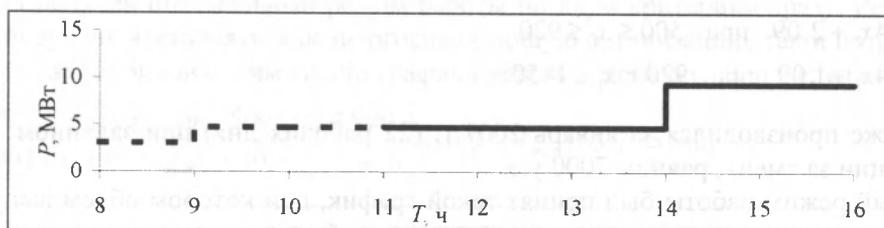


Рис. 5. Режим работы потребителя, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии

При оптимизации по критерию минимума расхода электроэнергии, потребитель максимально возможное количество времени работает в т. 4 (см. рис. 1). Но так как работа за смену в т. 4 не обеспечит необходимый объем производства, часть времени приходится работать на более энергоемкой характеристике II, в т. 6 (см. рис. 1). Очевидно, что график, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии, не всегда удовлетворяет потребителей, так как вынуждает платить несколько больше за расходуемую электроэнергию. Для решения этой проблемы была произведена дополнительная оптимизация по критерию минимума затрат при том же минимальном расходе электроэнергии:

$$Z = \left[ \begin{cases} 0,004x_1 + 1,09 & \text{при } 500 \leq x_1 \leq 920 \\ 0,004x_1 + 3,59 & \text{при } 920 < x_1 \leq 1450 \end{cases} \right] 810,5 + W_{\min} 165,7 \Rightarrow \min . \quad (7)$$

Полученный в результате двойной оптимизации график представлен на рис. 6.

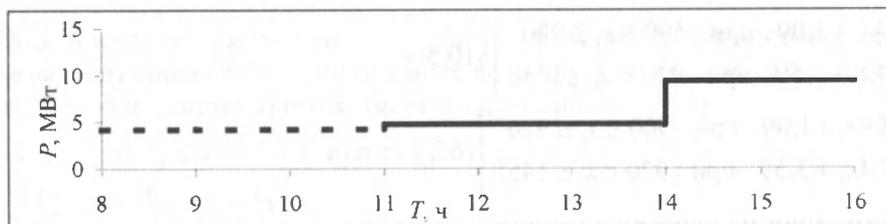


Рис. 6. Режим работы потребителя, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии и минимума затрат

Дополнительная оптимизация проводилась путем усреднения расхода электроэнергии в период максимальных нагрузок, т.е. работа в часы максимума производилась в т. 3 (см. рис. 1), что позволило снизить максимальную мощность нагрузки  $P_{\max}$ .

Количественные результаты, полученные благодаря оптимизации по разным критериям, представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что оптимизация по любому критерию способствует экономии электроэнергии и денежных средств. Оптимизация по двум критериям сразу снижает расход электроэнергии, а также уменьшает энергозатраты на выпуск продукции, что является выгодным для потребителя. Таким образом, только лишь за счет оптимального перераспределения объемов выпускаемой продукции возможно снижение не только потребления электроэнергии, но и энергозатрат.

Таблица 1. Результаты оптимизации электрических нагрузок при скачкообразном росте электропотребления

Оптимизация	Расход эл. энергии, тыс. кВт·ч	Затраты, тыс. руб.	Средняя цена эл. энергии, руб./кВт·ч	Удельный расход эл. энергии, кВт·ч/у.е.
Исходный график	60,72/100%	16213/100%	267/100%	7,69/100%
По минимуму затрат	48,22/79,4%	10830/66,8%	225/84,1%	6,03/79,4%
По минимуму электроэнергии	45,72/75,3%	11442/70,6%	250/93,7%	5,72/75,3%
По двум критериям сразу	45,72/75,3%	10988/67,8%	240/90,0 %	5,72/75,3%

Теперь рассмотрим оптимизацию режима работы потребителя за рабочую смену, который имеет зависимость расхода электроэнергии от объемов выпускаемой продукции вида 2 (см. рис. 2):

$$W_i = \begin{cases} 0,004x_i + 2,09 & \text{при } 500 \leq x_i \leq 920 \\ 0,004x_i + 1,09 & \text{при } 920 < x_i \leq 1450 \end{cases} \quad (8)$$

Расчет также производился за январь 2007 г. (22 рабочих дня) при заданном объеме производства продукции за смену, равном 7000 у.е.

За исходный режим работы был принят такой график, при котором объем выпускаемой продукции, а, следовательно, и расходуемая электроэнергия были равномерно распределены по всей смене (см. рис. 3). При равномерном распределении нагрузки работа осуществляется в т. 2 (см. рис. 2), т.е. на менее энергоэффективной характеристике III.

После оптимизации по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии (целевая функция для оптимизации представлена в формуле (9)), получили оптимальный график (рис. 7):

$$Z = \begin{cases} 0,004x_1 + 2,09 & \text{при } 500 \leq x_1 \leq 920 \\ 0,004x_1 + 1,09 & \text{при } 920 < x_1 \leq 1450 \end{cases} 810,5 + \\ + \sum_{i=1}^8 \begin{cases} 0,004x_i + 2,09 & \text{при } 500 \leq x_i \leq 920 \\ 0,004x_i + 1,09 & \text{при } 920 < x_i \leq 1450 \end{cases} 165,7 \Rightarrow \min. \quad (9)$$

Из графика видно, что для данного потребителя более выгодным является снижение до минимума объемов выпускаемой продукции в часы максимума, (см. рис. 2, т. 1) и работа на характеристике III. В остальное время потребитель должен работать на более энергоэффективной характеристике IV (см. рис. 2, т. 6).

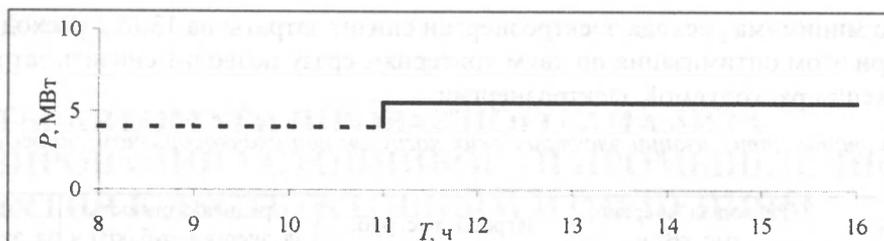


Рис. 7. Режим работы потребителя, оптимизированный по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии

Результаты оптимизации по критерию минимума расхода электроэнергии, приведены на рис. 8 и в следующей формуле:

$$W_{\min} = \sum_{i=1}^8 \begin{cases} 0,004x_i + 2,09 & \text{при } 500 \leq x_i \leq 920 \\ 0,004x_i + 1,09 & \text{при } 920 < x_i \leq 1450 \end{cases} \Rightarrow \min. \quad (10)$$

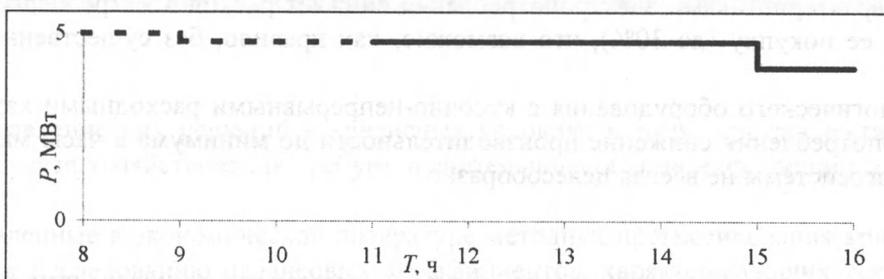


Рис. 8. Режим работы потребителя, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии

При оптимизации по критерию минимума расхода электроэнергии потребитель максимально возможное количество времени работает в т. 3, т.е. вначале более энергоэффективной характеристики IV (см. рис. 2). Но так как работа за смену в т. 4 не обеспечит необходимый объем производства, то часть времени придется работать на менее энергоэффективной характеристике III, в т. 1 (см. рис. 2).

Далее был получен оптимальный режим работы по двум критериям сразу. Результаты данной оптимизации будут удовлетворять, как энергоснабжающую организацию, так и потребителей. Полученный в результате двойной оптимизации график представлен на рис. 9, и в следующей формуле:

$$3 = \left[ \begin{cases} 0,004x_1 + 2,09 & \text{при } 500 \leq x_1 \leq 920 \\ 0,004x_1 + 1,09 & \text{при } 920 < x_1 \leq 1450 \end{cases} \right] 810,5 + W_{\min} 165,7 \Rightarrow \min. \quad (11)$$

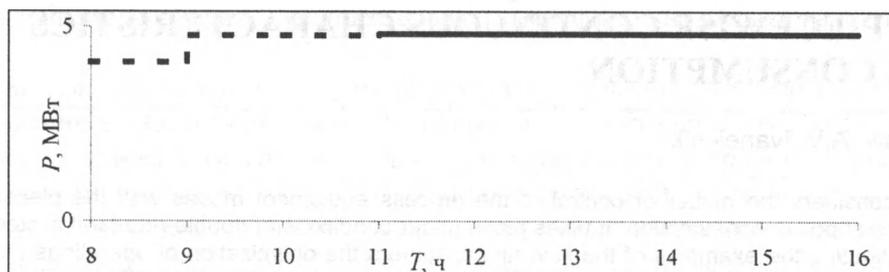


Рис. 9. Режим работы потребителя, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии и минимума затрат

После дополнительной оптимизации в периоды максимумов потребитель стал работать в т. 1 и 3 (см. рис. 2), а в оставшееся время – в т. 4 (рис. 2).

Количественные результаты, полученные благодаря оптимизации режимов работы по разным критериям, сведены в табл. 2.

Таким образом, видно, что оптимизация по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии позволит снизить энергозатраты на 17,1%, а расход электроэнергии на 11,2%. Оптимиза-

ция по критерию минимума расхода электроэнергии снизит затраты на 13,8%, расход электроэнергии на 15,7%. При этом оптимизация по двум критериям сразу позволит снизить затраты на 15,3% при том же снижении расходуемой электроэнергии.

**Таблица 2.** Результаты оптимизации электрических нагрузок при скачкообразном снижении электропотребления

Оптимизация	Расход эл. энергии, тыс. кВт·ч	Затраты, тыс. руб.	Средняя стоимость эл. энергии, руб./кВт·ч	Удельный расход эл. энергии, кВт·ч/у.е.
Исходный график	44,72/100%	11941/100%	267/100%	6,39/100%
По минимуму затрат	39,72/88,8%	9897/82,9%	249/93,3%	5,67/88,7%
По минимуму электроэнергии	37,72/84,3%	10291/86,2%	273/102,2%	5,39/84,4%
По двум критериям сразу	37,72/84,3%	10120/84,7%	268/100,5%	5,39/84,4%

● Управление режимами технологического оборудования с кусочно-непрерывными расходными характеристиками электропотребления снижает расход электроэнергии (до 25%) и затраты на ее покупку (до 30%), что возможно, как правило, без существенных денежных вложений.

Для технологического оборудования с кусочно-непрерывными расходными характеристиками электропотребления снижение производительности до минимума в часы максимумов нагрузки энергосистемы не всегда целесообразно.

## 📖 Литература

1. *Сбродов Г.П.* Методы. Алгоритмы и средства управления электропотреблением. – Минск: БПИ, 1988. – Ч.1: Методы и алгоритмы.
2. *Олейников В.К., Никифоров Г.В.* Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях: Учеб. пособие. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999.
3. *Колесник Ю.Н., Токочакова Н.В., Половинко С.И.* Использование математического моделирования для повышения эффективности работы участков нефтепровода. – Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, 2005, № 2, с. 32–36.
4. *Колесник Ю.Н., Веньгин К.А.* Адаптация моделей электропотребления к задачам контроля энергоэффективности нестабильно работающих потребителей. – Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006, №2, с. 88–94.
5. *Кузнецов А.В., Холод Н.И., Костевич Л.С.* Руководство к решению задач по математическому программированию. – Мн.: Высш. школа, 2001.

Поступила 16 июля 2008 г.

## CONTROL OF THE PROCESS EQUIPMENT MODES WITH THE PIECEWISE CONTINUOUS CHARACTERISTICS OF POWER CONSUMPTION

U.N. Kolesnik, A.V. Ivaneichik

This article considers the matter of control of the process equipment modes with the piecewise continuous characteristics of power consumption. It takes place under conditions of double-rate tariff system on the electric power. Investigating the examples of the several consumers the optimization of operations mode by the criterion of minimum expenses of the purchase of the electric power on double-rate tariff, the criterion of a minimum of the charge of the electric power and complex optimization by two criteria at once was made. The results of optimization promote economy of the electric power and money resources at the expense of redistribution of outputs only.