УДК 621.311

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫМИ РАСХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТАРИФАХ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

**Канд. техн. наук КОЛЕСНИК Ю. Н., асп. ИВАНЕЙЧИК А. В., ВЕНЬГИН К. А.**

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого*

У каждого технологического оборудования имеются свои расходные характеристики электропотребления, представляющие собой зависимости расхода электроэнергии $W$ от производительности либо объемов выпускаемой продукции $V$. Такие характеристики позволяют определять эффективность расхода электроэнергии и пути ее повышения путем оптимизации процесса производства [1]. Однако в последнее время, наряду с непрерывными расходными характеристики (рис. 1а), выделяются потребители с кусочно-непрерывными моделями (рис. 1б), с точками разрыва первого рода [2]. Таким потребителям свойственны существенные изменения производственной программы, что связано с работой в рыночных условиях функционирования [2–4]. В этих условиях возникает важная задача оптимизации для достижения наиболее эффективного режима производства.

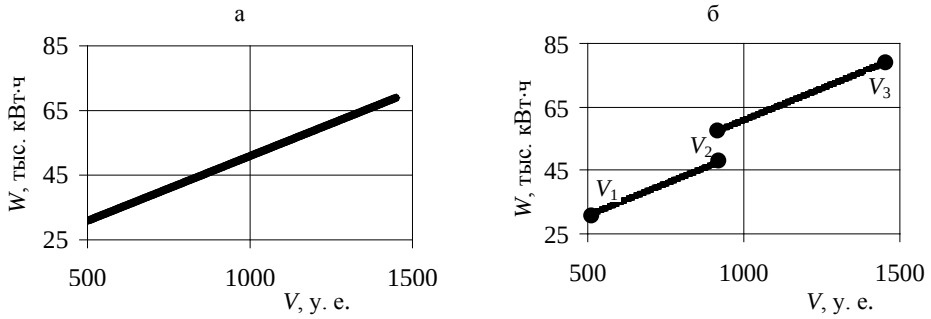


*Рис. 1.* Расходные характеристики электропотребления

Задачей данного исследования является оптимизация электрической нагрузки, обеспечивающая снижение затрат на покупку электроэнергии, расхода электроэнергии для производства заданного объема продукции путем управления режимами технологического оборудования с кусочно-непрерывными расходными характеристиками, в условиях различных тарифных систем. Необходимо найти такой режим, при котором затраты на покупку электроэнергии или расход электроэнергии будут минимальными. При этом возникает вопрос, на какой из характеристик и когда выгоднее работать? Что является более эффективным, снижение до минимума электропотребления в часы максимума нагрузки энергосистемы (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.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать обобщенную математическую модель электропотребления для предприятия с кусочно-непрерывными расходными характеристиками [4]. Создание такой модели позволит определить расчетные параметры электропотребления для дальнейшего управления режимами.

В общем случае кусочно-непрерывная модель электропотребления имеет следующий вид [5]:

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

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 за $x_1$, $x_2$, …, $x_{24}$, то затраты на покупку электроэнергии при заданном объеме продукции за сутки и двухставочном тарифе на электроэнергию будут иметь следующий вид:

$$З = \max \left[ \begin{array}{l} \begin{cases} a_1 x_1 + b_1 \text{ при } V_1 \le x_1 \le V_2; \\ a_2 x_1 + b_2 \text{ при } V_2 < x_1 \le V_3, \end{cases} \\ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \begin{cases} a_1 x_6 + b_1 \text{ при } V_1 \le x_6 \le V_2; \\ a_2 x_6 + b_2 \text{ при } V_2 < x_6 \le V_3, \end{cases} \end{array} \right] a + \left[ \sum_{i=1}^{24} \begin{cases} a_1 x_i + b_1 \text{ при } V_1 \le x_i \le V_2; \\ a_2 x_i + b_2 \text{ при } V_2 < x_i \le V_3, \end{cases} \right] b + З_п, \quad (2)$$

где $x_1$, …, $x_6$ – объемы выпущенной продукции в часы максимумов; $a$, $b$ – тарифные коэффициенты; $З_п$ – затраты, связанные с переходом из одного производственного режима в другой (в данной работе эти затраты не учитываются, т. е. $З_п = 0$, однако они являются предметом дальнейших исследований).

При двухставочно-дифференцированном тарифе затраты на электроэнергию будут вычисляться по формуле

$$З = \max \left[ \begin{array}{l} \begin{cases} a_1 x_1 + b_1 \text{ при } V_1 \le x_1 \le V_2; \\ a_2 x_1 + b_2 \text{ при } V_2 < x_1 \le V_3, \end{cases} \\ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \begin{cases} a_1 x_6 + b_1 \text{ при } V_1 \le x_6 \le V_2; \\ a_2 x_6 + b_2 \text{ при } V_2 < x_6 \le V_3, \end{cases} \end{array} \right] a k_a +$$

$$+ \left[ \begin{array}{c} \left[ \sum_{i=1}^{6} \begin{cases} a_1 x_i + b_1 \text{ при } V_1 \le x_i \le V_2; \\ a_2 x_i + b_2 \text{ при } V_2 < x_i \le V_3, \end{cases} \right] k_п + \left[ \sum_{i=7}^{13} \begin{cases} a_1 x_i + b_1 \text{ при } V_1 \le x_i \le V_2; \\ a_2 x_i + b_2 \text{ при } V_2 < x_i \le V_3, \end{cases} \right] k_н + \\ + \left[ \sum_{i=14}^{24} \begin{cases} a_1 x_i + b_1 \text{ при } V_1 \le x_i \le V_2; \\ a_2 x_i + b_2 \text{ при } V_2 < x_i \le V_3, \end{cases} \right] k_{пп} \end{array} \right] b + З_п, \quad (3)$$

где $x_1$, …, $x_6$, $x_7$, …, $x_{13}$, $x_{14}$, …, $x_{24}$ – объемы выпущенной продукции в пиковый (8.00–11.00 и 16.00–19.00), ночной (23.00–6.00) и полупиковый (6.00–8.00, 11.00–16.00 и 19.00–23.00) периоды соответственно; $k_a$ – понижающий коэффициент к ставке тарифа «*a*» (принимаем $k_a$ = 0,5); $k_н$, $k_п$, $k_{пп}$ – тарифные коэффициенты по расходуемой электроэнергии в ночной, пиковый и полупиковый периоды соответственно.

Рассмотрим изложенное выше на примере оптимизации режима электропотребления ОАО «Мозырьсоль». Предприятие рассчитывается за электроэнергию по двухставочному тарифу и характеризуется безостановочным технологическим процессом, нестабильной программой производства, долей электроэнергетической составляющей себестоимости продукции 30 % и годовым электропотреблением около 28 млн кВт·ч.

Сравним расход электроэнергии и затраты на ее покупку при текущем режиме работы предприятия и оптимальном в условиях оплаты за потребленную электроэнергию по двухставочному и двухставочно-дифференцированному тарифам.

При анализе состава оборудования и характерных режимов электропотребления на предприятии выявлено два типовых технологических состояния (технология с одной либо двумя выпарными системами), которые и формируют кусочно-непрерывную расходную характеристику предприятия.

Путем комплексного анализа режимов электропотребления предприятия была разработана обобщенная математическая модель электропотребления [5]. В результате получены уравнения для моделирования среднечасового электропотребления

$$W_i = \begin{cases} 0,0395V_i + 0,454 \text{ при } 21 \le V_i \le 38; \\ 0,0131V_i + 1,9532 \text{ при } 38 < V_i \le 60, \end{cases} \quad (4)$$

где $V_i$ – объем выпущенной продукции в *i*-м часу.

С помощью модели были получены расходные характеристики предприятия, представленные на рис. 2.

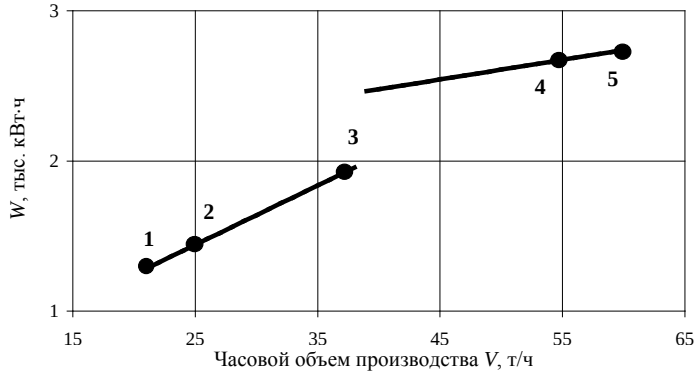


*Рис. 2.* Расходная характеристика ОАО «Мозырьсоль»

На основе полученных расходных характеристик был произведен расчет оптимальных режимов на месяц (30 рабочих дней) при заданном суточном объеме производства продукции, равном 1300 т. Оптимизация про-

изводилась методами линейного программирования [6] при двухставочном и двухставочно-дифференцированном тарифах на электроэнергию.

Исходный режим работы предприятия представлен на рис. 3, где пунктирной линией выделен период максимальных нагрузок, а серой – ночной период. Из графика видно, что электрическая нагрузка и, следовательно, объем выпускаемой продукции равномерно распределены по всем сменам. В этом случае работа ведется в т. 4 характеристики (рис. 2).

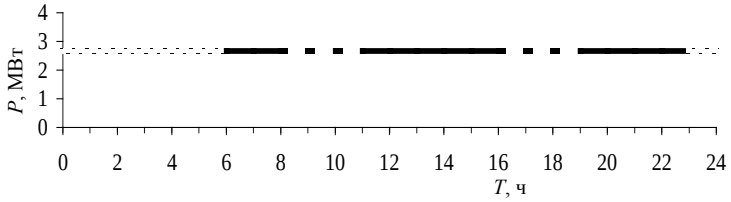


*Рис. 3*. Исходный режим работы предприятия

Оптимизация по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии производилась по (2) для двухставочного тарифа и по (3) для двухставочно-дифференцированного. Расчеты выполнялись с помощью программы Mathematica, на основе методов линейного программирования [6]. Оптимальный режим работы по обоим тарифам представлен на рис. 4.

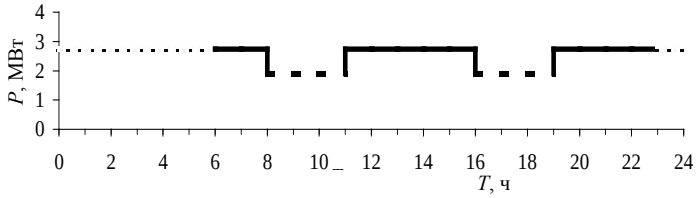


*Рис. 4.* Режим работы предприятия, оптимизированный по критерию минимума затрат на покупку электроэнергии

Из графика видно, что для предприятия с заданным суточным объемом производства 1300 т более выгодным является снижение объемов выпускаемой продукции в часы максимумов и работа в т. 3 (рис. 2). В оставшееся время потребитель работает на границе более энергоэффективной характеристики (т. 5, рис. 2).

Для оптимизации режима работы по критерию минимума расхода электроэнергии необходимо воспользоваться формулой (1). Результат оптимизации по обоим тарифам представлен на рис. 5.

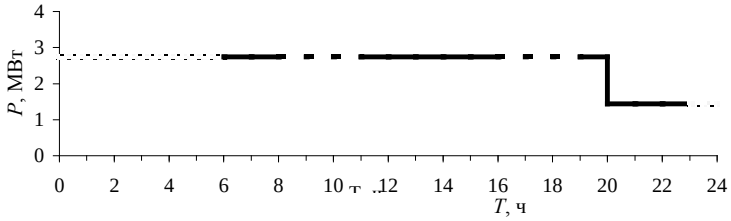


*Рис. 5.* Режим работы предприятия, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии

При данной оптимизации предприятие максимально возможное количество времени работает в т. 5 (рис. 2), т. е. на более энергоэффективной характеристике, а оставшееся время – в т. 2 (рис. 2).

Режим, 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 на покупку электроэнергии при том же минимальном электропотреблении

$$З = \max \left[ \begin{array}{l} \begin{cases} a_1 x_1 + b_1 \text{ при } V_1 \le x_1 \le V_2; \\ a_2 x_1 + b_2 \text{ при } V_2 < x_1 \le V_3, \end{cases} \\ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \begin{cases} a_1 x_6 + b_1 \text{ при } V_1 \le x_6 \le V_2; \\ a_2 x_6 + b_2 \text{ при } V_2 < x_6 \le V_3, \end{cases} \end{array} \right] a k_a + \left[ \begin{array}{l} W_{\min}^{\text{п}} k_{\text{п}} + \\ + W_{\min}^{\text{н}} + k_{\text{н}} + \\ + W_{\min}^{\text{пп}} + k_{\text{пп}} \end{array} \right] b + З_{\text{п}}. \quad (5)$$

Однако при двухставочном тарифе на электроэнергию результаты не изменились, а вот при двухставочно-дифференцированном они поменялись. Оптимизированный режим представлен на рис. 6.

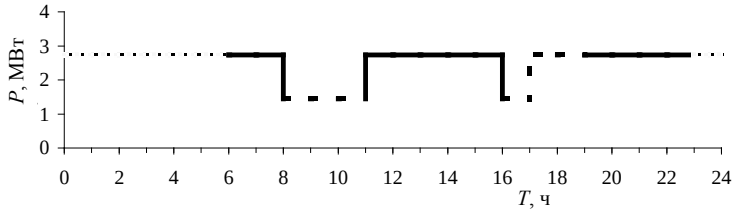


*Рис. 6.* Режим работы предприятия, оптимизированный по критерию минимума расхода электроэнергии и минимума затрат на ее покупку

Дополнительная оптимизация проводилась путем перераспределения времени работы в т. 2 (рис. 2), т. е. в точке с меньшим электропотреблением. Работа в т. 2 осуществлялась в пиковый временной интервал, что позволило хоть и незначительно, но снизить затраты на покупку электроэнергии при том же электропотреблении.

Количественные результаты, полученные благодаря оптимизации по разным критериям, представлены в табл. 1 и 2 для двухставочного и двухставочно-дифференцированных тарифов соответственно.

*Таблица 1*

**Результаты оптимизации электрической нагрузки при двухставочном тарифе на электроэнергию**

| Оптимизация | Расход электро-энергии, тыс. кВт·ч | Затраты, тыс. руб. | Средняя стоимость электро-энергии, руб./(кВт·ч) | Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/у. е. |
|---|---|---|---|---|
| Исходный график | 63,9/100 % | 12172,0/100 % | 190,5/100 % | 49,2/100 % |
| По минимуму затрат | 60,7/95,0 % | 11191,9/91,9 % | 184,3/96,8 % | 46,7/95,0 % |
| По минимуму электро-энергии | 60,6/94,7 % | 11661,2/95,8 % | 192,6/101,1 % | 46,6/94,7 % |

*Таблица 2*

**Результаты оптимизации электрической нагрузки при двухставочно-дифференцированном тарифе на электроэнергию**

| Оптимизация | Расход электро-энергии, тыс. кВт·ч | Затраты, тыс. руб. | Средняя стоимость электро-энергии, руб./(кВт·ч) | Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/у. е. |
|---|---|---|---|---|
| Исходный график | 63,9/100 % | 13582,4/100 % | 212,5/100 % | 49,2/100 % |
| По минимуму затрат | 60,7/95,0 % | 11988,9/88,3 % | 197,4/92,9 % | 46,7/95,0 % |
| По минимуму электроэнергии | 60,6/94,7 % | 13158,7/96,9 % | 217,3/102,3 % | 46,6/94,7 % |
| По двум критериям | 60,6/94,7 % | 12179,0/89,7 % | 201,1/94,6 % | 46,6/94,7 % |

Из таблиц видно, что при объеме производства 1300 т/сут. на рассматриваемом предприятии целесообразно использовать двухставочный тариф на электроэнергию. Однако важно отметить, что снижение затрат на покупку электроэнергии за счет оптимизации электрических нагрузок при двухставочно-дифференцированном тарифе значительно выше (10,3 %, табл. 2), чем при двухставочном (4,2 %, табл. 1). При этом оптимизация по любому критерию дает значительную экономию электроэнергии и денежных средств. Оптимизация по двум критериям сразу снижает расход электроэнергии, что выгодно энергосистеме, а также уменьшает затраты на ее покупку, что выгодно для потребителя. Таким образом, только лишь за счет оптимального перераспределения объемов выпускаемой продукции возможно снизить не только электропотребление, но и затраты на покупку электроэнергии. При этом следует отметить, что для практической реализации мероприятия могут быть необходимы средства управления графиками электрических нагрузок. Такими средствами могут быть потребители-регуляторы, а также собственные источники электроэнергии предприятия, например мини-ТЭЦ. Однако их внедрение требует серьезного технико-экономического анализа.

## В Ы В О Д Ы

1. Математические модели электропотребления предприятий с кусочно-непрерывными расходными характеристиками позволяют определять расчетные параметры для дальнейшего управления электрической нагрузкой.

2. Управление электрической нагрузкой предприятий с кусочно-непрерывными расходными характеристиками электропотребления позволяет снизить не только расход электроэнергии, но и затраты на ее покупку.

3. Снижение затрат на покупку электроэнергии за счет оптимизации электрических нагрузок при двухставочно-дифференцированном тарифе значительно выше, чем при двухставочном.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К о л е с н и к, Ю. Н. Моделирование, анализ и управление электропотреблением нестабильно работающих участков нефтепровода: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Ю. Н. Колесник. – Минск, 2003. – 144 с.

2. О л е й н и к о в, В. К. Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях: учеб. пособие / В. К. Олейников, Г. В. Никифоров. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. – 219 с.

3. К о л е с н и к, Ю. Н. Адаптация моделей электропотребления к задачам контроля энергоэффективности нестабильно работающих потребителей / Ю. Н. Колесник, К. А. Веньгин // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 2. – С. 88–94.

4. К о л е с н и к, Ю. Н. Использование математического моделирования для повышения эффективности работы участков нефтепровода / Ю. Н. Колесник, Н. В. Токочакова, С. И. Половинко // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2005. – № 2. – С. 32–36.

5. В е н ь г и н, К. А. Анализ методов и разработка алгоритмов контроля эффективности электропотребления предприятий с собственными генераторами электроэнергии: дис. ... магистр. техн. наук: 43.01.03 / К. А. Веньгин. – Гомель, 2007. – 103 с.

6. К у з н е ц о в, А. В. Руководство к решению задач по математическому программированию / А. В. Кузнецов, Н. И. Холод, Л. С. Костевич. – Минск: Вышэйш. шк., 2001. – 448 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 22.02.2008

УДК 621.315

# ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ ГИБКИХ СБОРНЫХ ШИН СО СПУСКАМИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

**Инж. ПОНОМАРЕНКО Е. Г.**

*Белорусский национальный технический университет*

Проведенные в различных странах исследования показали, что при существующих уровнях токов короткого замыкания в энергосистемах возможно недопустимое сближение и даже схлестывание проводов разных фаз в результате электродинамического действия токов КЗ [1]. Особую опасность представляют недопустимые сближения проводов сборных шин распределительных устройств. В этом случае релейная защита отключает систему сборных шин со всеми присоединениями. Однако расчет движения сборных шин со спусками является сложной задачей. Необходимо оценить движение системы взаимосвязанных проводов под воздействием электродинамических усилий. Численное решение указанной задачи получено несколькими авторами [2–4]. Разработаны компьютерные программы, пригодные для постановки вычислительного эксперимента, так как они учитывают различные влияющие факторы и конструктивные элементы распределительных устройств. В то же время в проектной практике востребованы упрощенные методы расчета сближения сборных шин со спусками при коротком замыкании, не требующие обращения к ЭВМ.