

УДК 621.311

МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВНО-ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МНОГОФАКТОРНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Е. Л. ШЕНЕЦ

ОАО «Газпром трансгаз Беларусь», г. Минск

А. А. КАПАНСКИЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Для промышленных предприятий с многономенклатурным производством разработан метод распределения условно-постоянной составляющей общезаводского расхода электрической энергии по видам продукции, основанный на построении многофакторной математической модели электропотребления и учитывающий энергоемкость каждого вида продукции.

Ключевые слова: энергоэффективность, удельный расход электроэнергии, многономенклатурное предприятие, общие затраты электрической энергии.

METHOD OF DISTRIBUTION OF CONDITIONALLY CONSTANT COMPONENT OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION DURING CONSTRUCTION OF MULTIFACTORIAL MATHEMATICAL MODELS OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION

E. L. SHENETS

OAO Gazprom Transgaz Belarus, Minsk

A. A. KAPANSKY

Educational Institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus

For industrial enterprises with multi-item production, a method has been developed for distribution of the conditionally constant component of the plant-wide electric energy consumption by types of products, based on the construction of a multifactor mathematical model of power consumption and taking into account the energy intensity of each type of product.

Keywords: energy efficiency, specific consumption of electricity, multi-item enterprise, total consumption of electric energy.

Введение

В 90-х гг. прошлого столетия энергетики промышленных предприятий столкнулись с проблемой, когда при общем спаде производства не произошло пропорционального снижения потребления энергетических ресурсов, и, в первую очередь, эта проблема затронула электрическую энергию (ЭЭ). Это оказалось, на первый взгляд, парадоксом: снижение выпуска продукции приводило к непропорциональному сни-

жению электропотребления. Объяснение проблемы было найдено при анализе структуры электропотребления промышленного предприятия: расход ЭЭ включает условно-постоянную составляющую, которая напрямую не связана с технологией и слабо зависит от объема выпуска продукции, и технологическую составляющую, зависящую от объемов выпуска продукции. К условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ относится электропотребление вспомогательных производств, ремонтно-механических, электроремонтных цехов, административных зданий, складских помещений, а также освещение и вентиляция производственных цехов.

Ранее было показано, что в наиболее общем виде энергетическая характеристика может быть представлена уравнением [1]:

$$W = w_{\text{уд.техн}} \Pi + W_{\text{усл.-пост}} \quad (1)$$

где W – расход ЭЭ за определенный интервал времени, тыс. кВт · ч/ед. продукции; $w_{\text{уд.техн}}$ – удельно-технологический расход ЭЭ на единицу продукции, тыс. кВт · ч; Π – объем продукции за соответствующее время, ед. продукции; $W_{\text{усл.-пост}}$ – постоянная часть расхода ЭЭ, в основном не зависящая от нагрузки, тыс. кВт · ч.

Именно наличие в заводском, цеховом электропотреблении условно-постоянной составляющей привело к тому, что в общем виде общезаводской удельный расход ЭЭ $W_{\text{уд}}$ имеет гиперболическую зависимость от объема выпуска продукции (рис. 1):

$$W_{\text{уд}} = w_{\text{уд.техн}} + \frac{W_{\text{усл.-пост}}}{\Pi}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. продукции.} \quad (2)$$

Наличие условно-постоянной составляющей в расходе энергоресурса определяет:

- регулировочную способность по энергоэффективности (ЭЭФ) за счет изменения объема выпуска продукции (горизонтальное регулирование ЭЭФ);
- текущее состояние энергоэффективности производства;
- эффективность внедряемых мероприятий по энергосбережению.

Последнее особенно важно, так как неоспоримым является тот факт, что при внедрении энергосберегающих технологий эффект от внедряемых мероприятий значительно ниже прогнозных значений либо не достигается вообще.

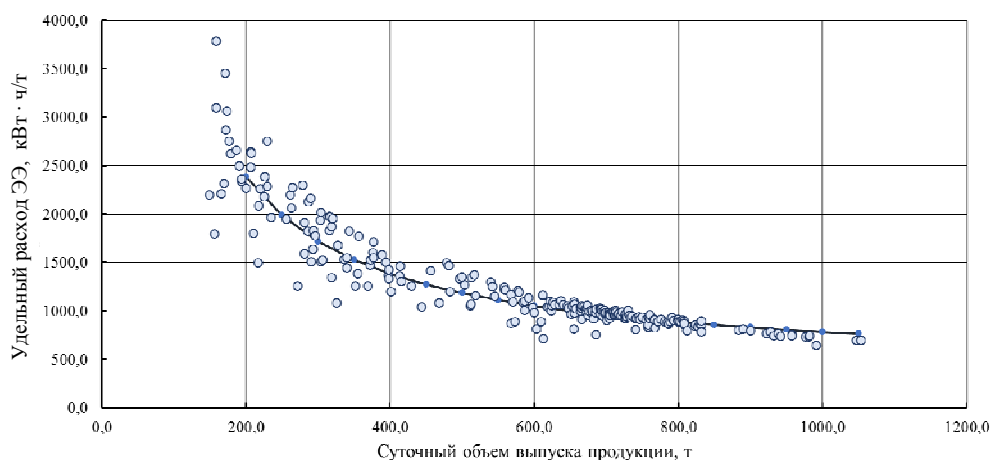


Рис. 1. Зависимость общезаводского удельного расхода электрической энергии при изменении объема выпуска продукции для производства целлюлозы

Как видно из рис. 1, при росте загрузки производства общезаводской удельный расход ЭЭ снижается и, наоборот, возрастает при уменьшении объемов выпуска продукции. В результате одно и то же производство имеет достаточно широкий диапазон изменения фактического удельного расхода ЭЭ. А ведь значения удельного расхода ЭЭ входят в структуру себестоимости продукции, что может в условиях рынка значительно повлиять на конкурентоспособность продукции. Поэтому условно-постоянная составляющая затрат энергоресурса включена в показатели энергоэффективности наряду с абсолютной величиной потребления энергоресурсов, удельным расходом энергоресурсов на единицу выпускаемой продукции, энергетической составляющей себестоимости продукции [2]–[4].

Исследования показали, что значительная доля в общем балансе электропотребления – условно-постоянная составляющая современных промышленных производств. Причем эта доля также варьируется в общем объеме энергоресурса при изменении объема выпуска продукции (см. таблицу).

Оценка веса условно-постоянной расхода электрической энергии различных производств в общем электропотреблении электрической энергии при изменении объема выпуска продукции

Производство	Продукция			Вес $W_{\text{усл.-пост}}$ в общем расходе $W_{\text{общ}}$, %	
	Единица измерения	Максимальный объем выпуска $P_{\text{макс}}$	Минимальный объем выпуска $P_{\text{мин}}$	При $P_{\text{макс}}$	При $P_{\text{мин}}$
Производство метанола	т	329,5	145,7	86,3	93,45
Сверхкрупногабаритные шины	усл. шины	1300	260	18,9	53,78
Массовые шины	усл. шины	1 400 000	600 000	33,0	53,52
Изделия из пластмассы	т	6	4,5	81,9	85,75
Обувь	тыс. усл. ед.	25	17	6,6	9,41
Швейные изделия	тыс. усл. ед.	120	20	71,1	93,64
Костюмы	тыс. усл. ед.	55	10	18,6	55,75
Выдувная полимерная многослойная пленка	т	50	5	22,7	74,59
Производство спирта	тыс. дал	90	50	2,9	5,12
Выпуск изделий из пластика	кг	40 000	20 000	29,4	45,48
Продукция машиностроения	усл. ед.	1200	200	23,2	64,39
Товары народного потребления	усл. ед.	10 000	2000	30,2	68,43
Мебель	усл. ед.	400	100	3,6	12,96
Электротехнические изделия	тыс. усл. ед.	14	5	65,2	83,98
Производство хлеба	т	395	320	39,7	44,86

Сложной является задача определения величины $W_{\text{усл.-пост}}$ составляющей ЭЭ, чтобы оценить степень ее влияния на $W_{\text{уд}}$, а также прогнозирования показателей ЭЭФ при учете изменения производственной программы и внедрения мероприятий по энергосбережению. Здесь можно применять два подхода:

1. Определение $W_{\text{усл.-пост}}$ ЭЭ на основе полного электрического баланса предприятия, где из общего количества потребителей ЭЭ выделяются группы, отдельные электроприемники (ЭП), которые не участвуют непосредственно в технологическом процессе. Однако такой подход является наиболее трудоемким, поскольку для современных производств общее количество ЭП может достигать десятков или даже сотен тысяч единиц.

2. Второй подход основан на построении математических моделей зависимости потребления ЭЭ от объема выпуска продукции. В условиях выпуска одного вида продукции модель имеет вид (1). При многономенклатурном производстве это аддитивная модель вида [6]–[10]:

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i x_i + b, \quad (3)$$

где Y – результативный признак модели (общезаводской расход ЭЭ); n – количество факторов (видов продукции Π_i), включенных в модель; a_i – коэффициент регрессии при i -м признаке (технологический расход ЭЭ i -го вида продукции); x_i – факторный признак модели (объем выпуска i -го вида продукции); b – свободный член уравнения.

При построении модели режима электропотребления промышленного предприятия (ПП) результативным признаком является расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а в качестве факторных признаков могут служить качественные и количественные показатели произведенной продукции. Коэффициент регрессии при этом отражает степень влияния фактора на величину потребления энергоресурса предприятия. Свободный член уравнения включает в себя расход ТЭР, не зависящий ни от одного из факторов.

Для оценки энергоэффективности отдельного вида продукции осуществляется переход от абсолютной величины потребления энергоресурсов к удельному значению. Для предприятий, выпускающих несколько видов продукции, актуальна задача разработки метода распределения общезаводских либо общецеховых затрат ЭЭ между несколькими видами продукции при определении удельных расходов ЭЭ на выпуск единицы соответствующей продукции [11], [12], что и является целью данной статьи.

Основная часть

Существующая практика распределения общепроизводственного расхода ЭЭ или другого энергоресурса осуществляется пропорционально объему производства i -го вида продукции [13], [14]:

$$W_{\text{уд}_i} = \frac{W_i}{\Pi_i} = \frac{W_{\text{техн}_i} + W_{\Sigma\text{общ}}}{\Pi_i}, \quad (4)$$

где Π_i – производственная программа i -го вида продукции, кВт · ч/ед. продукции; $W_{\text{техн}_i}$ – технологический расход ЭЭ i -го вида продукции, кВт · ч; $W_{\Sigma\text{общ}}$ – условно-постоянный расход энергопотребления, включающий как общепроизводственный расход, так и постоянный технологический расход ЭЭ, кВт · ч:

$$W_{\text{техн}_i} = w_{\text{уд.техн}_i} \Pi_i. \quad (5)$$

После преобразования формулы (1) удельный расход ЭЭ i -го вида продукции составит:

$$W_{уд_i} = \frac{W_{уд.техн} \Pi_i}{\Pi_i} + \frac{W_{\Sigma общ}}{\Pi_i} = W_{техн_i} + \frac{W_{\Sigma общ}}{\Pi_i}, \quad (6)$$

где $W_{техн_i}$ – технологический расход i -го вида продукции, кВт · ч/ед. продукции.

При распределении условно-постоянной расхода ЭЭ (или любого другого энергоресурса) с помощью существующих методов остается неучтенной энергоемкость i -го вида продукции, что ведет к искаженной оценке удельных расходов [15]–[18]. В итоге возникает вероятность того, что при изменении производственной программы энергетическая составляющая искажается как в сторону завышения, так и занижения по отдельным видам продукции. Многие предприятия пытаются решить эту проблему, когда из нескольких видов продукции выбирается основной и на него относятся все общезаводские затраты. Тогда для остальных видов продукции норма или удельный расход энергоресурса является по сути технологическим либо цеховым.

Для промышленных предприятий с многономенклатурным производством разработан метод распределения условно-постоянной составляющей общезаводского расхода электрической энергии по видам продукции, который основан на построении многофакторной математической модели электропотребления и учитывает коэффициент энергоемкости каждого вида продукции.

Распределение условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ (или другого энергоресурса) описывается следующими действиями:

1. На основе статистических данных по объемам выпуска продукции и суммарного расхода ЭЭ производства осуществляется построение математической модели зависимости электропотребления от объемов выпуска всех видов продукции. В качестве факторов модели выступают объемы различных видов продукции:

$$W = W_{\Sigma общ} + \sum_{i=1}^{i=n} (\Pi_i W_{уд.техн_i}). \quad (7)$$

2. В результате построения аддитивных моделей электропотребления определяются коэффициенты регрессии i -го вида продукции (параметры модели), характеризующие удельный технологический расход $W_{техн_i}$ и одновременно зависящие от суммарного значения произведенной продукции.

3. Определяются средневзвешенные коэффициенты регрессии (технологический расход ЭЭ) в соответствии с производственной номенклатурой:

$$W_{уд.техн_i}^{ср.взв} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Pi_i W_{уд.техн_i})}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} = \frac{W_{техн}^B}{\sum_{i=1}^n \Pi_i}, \quad (8)$$

где $W_{техн}^B$ – валовой технологический расход ЭЭ исследуемого производства, кВт · ч.

4. Определяется коэффициент энергоемкости i -го вида продукции как отношение i -го удельного технологического расхода к полученному средневзвешенному значению:

$$k_{Э_i} = \frac{W_{уд.техн_i}}{W_{уд.техн_i}^{ср.взв}}. \quad (9)$$

5. Производится распределение условно-постоянного расхода ЭЭ по видам продукции:

$$W_{\text{общ}_i} = \frac{k_{\text{Э}_i} W_{\text{Σобщ}} \Pi_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i}. \quad (10)$$

6. Определяется удельный расход с учетом доли энергоемкости и объема производства ТЭР i -го вида продукции:

$$W_{\text{уд}_i} = w_{\text{уд.техн}_i} + \frac{k_{\text{Э}_i} W_{\text{Σобщ}} \Pi_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} = w_{\text{уд.техн}_i} + \frac{W_{\text{общ}_i}}{\Pi_i}. \quad (11)$$

Рассмотрим следующий пример. Пускай предприятие «В» выпускает четыре вида продукции: $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$. В результате обработки статистических данных, описывающих режимы электропотребления производства, получена математическая модель вида:

$$W = 100 + 0,1 \cdot \Pi_1 + 0,05 \cdot \Pi_2 + 0,25 \cdot \Pi_3 + 0,4 \cdot \Pi_4, \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч.}$$

По данным производственно-технического отдела планируемые объемы производства составят: $\Pi_1 = 100$ тыс. усл. ед.; $\Pi_2 = 250$ тыс. усл. ед.; $\Pi_3 = 1000$ тыс. усл. ед.; $\Pi_4 = 10$ тыс. усл. ед.

Суммарный объем производства равен: $100 + 250 + 1000 + 10 = 1360$ усл. ед. Тогда на планируемый период средневзвешенный удельный расход ТЭР группы продукции составит:

$$W_{\text{уд.техн}_i}^{\text{ср.взв}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Pi_i w_{\text{уд.техн}_i})}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} =$$

$$= \frac{100 \cdot 0,1 + 250 \cdot 0,05 + 1000 \cdot 0,25 + 10 \cdot 0,4}{100 + 250 + 1000 + 10} = 0,203 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. продукции.}$$

На основании формулы (9) определяем коэффициенты энергоемкости:

$$k_{\text{Э}_i} = \frac{w_{\text{уд.техн}_i}}{w_{\text{уд.техн}_i}^{\text{ср.взв}}} = \left. \begin{array}{l} 0,1/0,203 = 0,5, \\ 0,05/0,203 = 0,2, \\ 0,25/0,203 = 1,2, \\ 0,4/0,203 = 2,0. \end{array} \right\}$$

При помощи формулы (10) проведем распределение условно-постоянного расхода ЭЭ, что удобно представить в виде:

$$W_{\text{общ}_i} = \frac{k_{\text{Э}_i} W_{\text{Σобщ}} \Pi_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} = \left. \begin{array}{l} 0,5 \cdot 100 \cdot 100 / 1360 = 3,6, \\ 0,2 \cdot 100 \cdot 250 / 1360 = 4,5, \\ 1,2 \cdot 100 \cdot 1000 / 1360 = 90,4, \\ 2,0 \cdot 100 \cdot 10 / 1360 = 1,4, \end{array} \right\} \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч.}$$

В итоге, учитывая энергоемкость отдельного вида продукции, удельные расходы потребления ЭЭ с учетом распределения условно-постоянной составляющей математической модели на основании формулы (11) составят:

$$W_{уд_i} = w_{уд.техн_i} + \frac{W_{общ_i}}{\Pi_i} = \left. \begin{array}{l} 0,1 + 3,6/100 = 0,14, \\ 0,05 + 4,5/250 = 0,07, \\ 0,25 + 90,4/1000 = 0,34, \\ 0,4 + 1,4/10 = 0,54, \end{array} \right\} \text{кВт} \cdot \text{ч/ед. продукции.}$$

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Наличие условно-постоянной составляющей в общем расходе энергоресурса определяет регулировочную способность по энергоэффективности промышленных производств за счет изменения объема выпуска продукции (горизонтальное регулирование ЭЭФ); текущее состояние энергоэффективности производства; эффективность внедряемых мероприятий по энергосбережению.

2. Условно-постоянная расхода энергоресурса современных промышленных производств может составлять существенную долю в общем расходе ЭЭ производства. Причем эта доля также значительно варьируется в общем объеме энергоресурса при изменении объема выпуска продукции.

3. Для промышленных предприятий с многономенклатурным производством разработан метод распределения условно-постоянной составляющей общезаводского расхода электрической энергии по видам продукции, основанный на построении многофакторной математической модели электропотребления и учете коэффициента энергоемкости каждого вида продукции.

4. Практическое применение метода для многономенклатурных производств позволит более объективно отнести затраты ТЭР на каждый вид продукции и сформировать ее себестоимость.

Литература

1. Кудрин, Б. И. Электроснабжение, оперативное и планируемое нормирование расхода электроэнергии, энергосбережение / Б. И. Кудрин // *Электрика*. – 2007. – № 4. – С. 3–6.
2. Кудрин, Б. И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Б. И. Кудрин // *Пром. энергетика*. – 2000. – № 6. – С. 33–36.
3. Техничко-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах горных предприятий / О. В. Федоров [и др.] // *Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики*. – 2016. – № 9/10. – С. 91–97.
4. Федоров, О. В. Энергосберегающая политика : монография / О. В. Федоров, А. Б. Дарьенков. – М. : КНОРУС, 2015. – 294 с.
5. Федоров, О. В. Ресурсосбережение в энергетике : монография / О. В. Федоров, Н. В. Голубцов, И. И. Гребенюк. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 247 с.
6. Токочакова, Н. В. Способы построения расчетно-статистических моделей электропотребления промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. – 2006. – № 2 (25). – С. 37–46.
7. Закономерности формирования экономии ЭЭ промышленных потребителей / В. А. Анищенко [и др.] // *Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та*. – 2006. – № 1. – С. 28–38.

8. Никифоров, Г. В. Совершенствование нормирования и планирования электропотребления в промышленном производстве / Г. В. Никифоров // Пром. энергетика. – 1999. – № 3. – С. 27–29.
9. Олейников 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.
10. Олейников, В. К. Нормирование энергозатрат при многономенклатурном производстве / В. К. Олейников, Г. В. Никифоров // Пром. энергетика. – 2000. – № 6. – С. 30–32.
11. Шенец, Е. Л. Анализ показателей эффективности использования энергоресурсов и методов оценки эффективности внедрения мероприятий по энергосбережению на промышленных предприятиях / Е. Л. Шенец, А. А. Капанский // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 2. – С. 6–11.
12. Грунтович, Н. В. Прогнозирование энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения при внедрении мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2016. – № 1. – С. 44–48.
13. Ведомственная инструкция и методики по нормированию расхода тепловой и электрической энергии в производстве мебели и деревообработки. – М. : МНПМО «Минскпроектмебель», 1994.
14. Методические указания по нормированию расхода тепловой и электрической энергии на предприятиях легкой промышленности. – М. : ЦНИИТЭИлегпром, 1984. – 153 с.
15. Токочакова, Н. В. Показатели энергетической эффективности промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3 (26). – С. 66–75.
16. Грунтович, Н. В. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2015. – № 3. – С. 20–23.
17. Токочакова, Н. В. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Энергоэффективность. – 2006. – № 1. – С. 14–15.
18. Грунтович, Н. В. Проблемные зоны системы управления энергоэффективностью промышленных потребителей республики / Н. В. Грунтович, Н. В. Токочакова // Энергоэффективность. – 2008. – № 3. – С. 6–10.

Получено 06.06.2022 г.