

УДК 621.311

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

Н. В. ГРУНТОВИЧ, Е. Л. ШЕНЕЦ, С. А. ЖЕРАНОВ

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

Введение

Предприятия по производству листового стекла являются потребителями ТЭР со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Это означает, что на конечное потребление того или иного энергоресурса, затрачиваемого на производство стекла, влияет значительное количество технологических факторов. Поэтому для таких потребителей сложной и актуальной остается проблема оценки эффективности внедряемых мероприятий по энергосбережению. Сложность задачи обуславливается тем, что технологические линии производства листового стекла работают в условиях изменяющейся производственной программы, что оказывает значительное влияние на результирующую энергоэффективность (ЭЭФ) режимов работы. В настоящее время стекольные предприятия Республики Беларусь активно занимаются реконструкцией своих производств. Для оценки ЭЭФ технологического процесса производства листового стекла в условиях проводимой модернизации и реконструкции могут быть использованы два подхода:

- оценка ЭЭФ с использованием однофакторных моделей энергопотребления на выпуск продукции;
- оценка ЭЭФ на основе анализа структурных моделей удельных расходов ТЭР на производство продукции (листового стекла).

Основная часть

Рассмотрим подходы к оценке ЭЭФ и ее динамики для технологических линий производства листового стекла с использованием структурных моделей удельных расходов ТЭР на выпуск продукции.

В качестве математического аппарата для анализа энергоэффективности производства листового стекла используется кластерный анализ [1], [2].

Кластерный анализ, а именно *структурный анализ данных*, имеет ряд преимуществ:

- позволяет наглядно представить информацию обрабатываемых статистических данных в виде структурных моделей удельных расходов ТЭР на производство листового стекла;
- по показателям модели выявить базисный режим работы технологической линии и дополнительные рабочие режимы, которые позволяют оценить ЭЭФ производства и предложить мероприятия, направленные на ее повышение.

Структурную группировку технологических состояний объекта (одномерное пространство признаков) можно выполнить в следующей последовательности [1], [3]:

1. Количественные характеристики признака на начальном этапе рассматриваются как отдельные классы. Происходит сравнение значений признака по всем классам.

2. Два ближайших класса объединяются, и рассчитывается расстояние от этого класса до остальных по выражению

$$R_{k_j k_i} = \sqrt{(M_{k_j} - M_{k_i})^2}, \quad (1)$$

где M_{k_j} , M_{k_i} – средние значения классифицируемого признака по классам k_j и k_i соответственно.

После чего определяется значение внутриклассового коэффициента вариации по каждому классу:

$$V = \left(\frac{\sigma_{k_i(j)}}{M_{k_i(j)}} \right) 100 \%, \quad (2)$$

где $\sigma_{k_i(j)}$ – среднее квадратическое отклонение значения признака по классам k_j и k_i .

Каждый сформированный класс характеризуется объемом и средней величиной характеристики признака, а также значением коэффициента вариации, характеризующим качество разбиения.

3. Классы с наименьшим расстоянием объединяются вновь (рис. 1).

Процесс повторяется до тех пор, пока максимальный коэффициент вариации не превысит заданного значения. Если по оси ординат откладывать средние значения характеристики признака, а по оси абсцисс количество признаков, вошедших в каждый класс, то в результате получим структурную модель (рис. 2) классифицируемого признака. Ранее были получены структурные модели суточного электропотребления [3], [4] промышленных предприятий и выявлены закономерности их формирования.

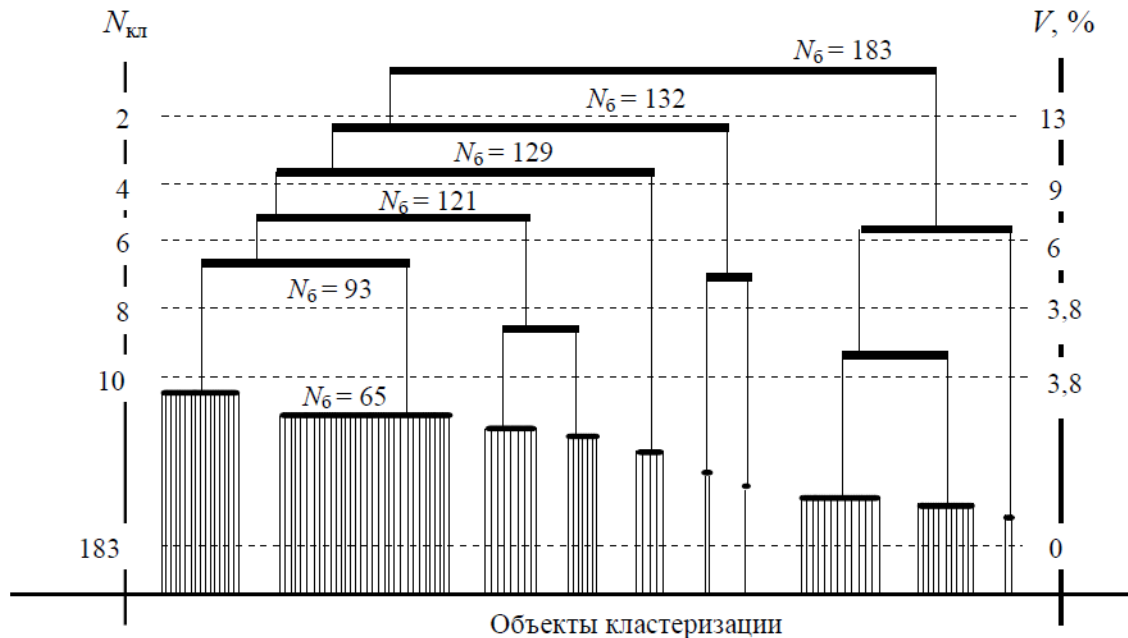


Рис. 1. Дендограмма кластеризации методом средней связи:
 $N_{\text{кл}}$ – количество классов на каждом шаге кластеризации;
 V – коэффициент вариации базисного класса емкостью N_6

Ранее проведенные исследования структуры суточного электропотребления ($W_{\text{сут}}$) промышленными предприятиями (ПП) на годовом интервале позволили не только выявить закономерности формирования структуры суточного электропотреб-

ления каждого ПП, но и доказать устойчивость структуры во времени [3], [4]. В структурной модели выделялся *базисный класс* (самый емкий по количеству дней, вошедших в него). У ПП базисный класс по временной емкости составлял от 70 до 95 % исследуемой выборки.

Для ПП было установлено три вида структурных моделей $W_{сут}$: с верхним расположением базисной ступени (рис. 2); со средним расположением базисной ступени; с нижним расположением базисной ступени. Знание закономерностей структуры $W_{сут}$ позволяло решать задачи прогнозирования параметров электропотребления, оценивать возможность безущербного регулирования электропотребления ПП. С использованием параметров структурной модели $W_{сут}$ давалась оценка стабильности режимов работы ПП. О стабильности режимов электропотребления и отлаженности технологического процесса свидетельствует большая временная емкость базисного класса (60–95 % рабочих дней предприятия) и незначительная величина отклонения среднесуточного электропотребления дополнительных классов относительно базисной ступени (5–10 %).

Для 90-х гг. был характерен общий спад производства и нестабильность режимов работы ПП, что заметно сказалось на их структуре электропотребления: у большинства ПП структурная модель суточного электропотребления трансформировалась в *модель с дроблением ступеней*, в которой невозможно выделить базисный класс. ПП, имеющие модель электропотребления с дроблением ступеней, первыми ощутили на себе сложности прогнозирования и нормирования расхода ЭЭ, так как их режимы работы отличает многовариантность, учесть которую не представляется возможным с использованием аналитических подходов и месячной, квартальной статистики по потреблению электрической энергии и технологическим показателям [4].

Аналогичные исследования, но применительно к удельным расходам ТЭР на единицу продукции, были произведены для технологических линий производства листового стекла. Для исследований была сформирована информационная база суточных данных по параметрам технологического процесса производства листового стекла.

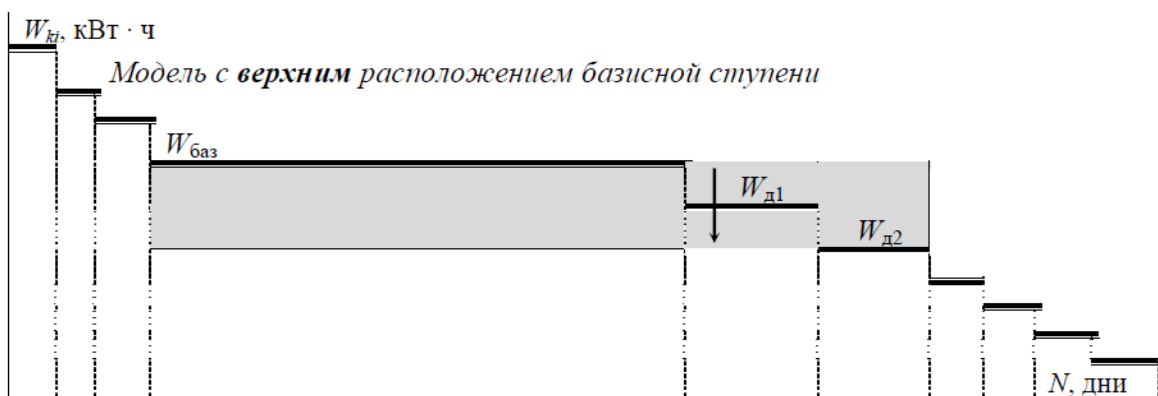


Рис. 2. Один из характерных видов структурной модели суточного электропотребления промышленными предприятиями

Основным энергоносителем технологического процесса производства листового стекла является природный газ. Современные стекловаренные печи высокой производительности могут быть оборудованы дополнительным электроподогревом (ДЭП), в качестве второго энергетического ресурса выступает электроэнергия.

Для комплексной оценки ЭЭФ, введенной в эксплуатацию технологической линии Л2, воспользуемся общими затратами ТЭР, приведенными к условному топливу, т у. т.

Перевод расхода природного газа, м³, и потребленной электроэнергии, кВт · ч, в т у. т. производится с учетом действительных коэффициентов по формуле

$$\text{ОЭЗ} = W_{\text{э,сут}} \cdot 0,28/1000 + W_{\text{газ,сут}}/1000(Q_{\text{н}}^{\text{п}}/7000), \text{ т у. т.}, \quad (3)$$

где 0,28 – калорийный коэффициент пересчета электрической энергии, выраженной в тыс. кВт · ч в условное; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – фактическое значение теплоты сгорания газа, ккал/м³.

Кластеризация суточных удельных значений расхода ТЭР произведена с помощью программы «KLAST».

Результаты кластеризации суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла за 2009–2010 гг. представлены в табл. 1. Разбиение всей совокупности удельных расходов ТЭР ограничено десятью классами. При этом следует отметить высокое качество классификации, поскольку коэффициент вариации, характеризующий качество разбиения, находится в диапазоне от 0 до 4,65 %.

Базисный режим работы в 2009 г. включает 226 дней (61,9 % от общего количества) со среднесуточным удельным значением ТЭР – 265,5 кг у. т./т, или 0,265 т у. т./т. Наряду с базисным режимом можно выделить два класса – 6 и 8 со значениями удельных расходов ТЭР: 283,7 кг у. т./т и 254,1, кг у. т./т, временная емкость которых, составляет, соответственно, 24 и 107 суток.

В табл. 1 представлены результаты кластеризации суточных удельных значений ТЭР за 2010 г. и структурная модель.

Как видно из данных приложения, в 2010 г. базисным режимом является класс № 8 со среднесуточными удельными затратами ТЭР 205,4 кг у. т./т и временной емкостью 155 суток, охватывающим 42 % годового времени. Этот класс характеризует режимы ввода в эксплуатацию технологической линии Л2. Сопоставив базисные значения удельных расходов ТЭР 2010 и 2009 гг., можно определить эффективность производства листового стекла от ввода в эксплуатацию линии Л2:

$$\Delta\text{ЭЭФ} = (205,4 - 265,5)/265,5 \cdot 100 \% = -22 \% \text{ (экономия)}.$$

Помимо базисного режима, определенным вводом линии Л2, существует еще два режима – это классы № 5 и 7 со средними удельными расходами ТЭР 263,8 кг у. т./т (временная емкость – 82 дня) – работа линии Л1, и удельные расходы ТЭР 232,7 кг у. т./т (временная емкость класса 81 день – совместный режим старой линии Л1 и Л2).

В табл. 2 представлены результаты кластеризации суточных удельных значений ТЭР за 2011–2012 гг.

Как видно из табл., в 2011 г. равнозначными по емкости являются два класса – класс № 3 и класс № 4, а также два дополнительных класса – № 2 и № 5. Это объясняется отладкой режимов новой технологической линии Л2.

В 2012 г. была продолжена отладка технологической линии Л2, причем с дальнейшим снижением удельных значений расхода ТЭР относительно базисного режима 2011 г. Рост энергоэффективности производства составил (относительно базисных классов 2012 и 2011 гг.):

$$\Delta\text{ЭЭФ} = (202,3 - 221,6)/221,6 \cdot 100 \% = -8 \% \text{ (экономия)}.$$

Таблица 1

Результаты кластеризации (структурного анализа) суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла

Номер класса	Среднее удельное значение расхода ТЭР класса, кг у. т./т	Количество дней в классе, сут	Чистота класса, %	2009 г.	
				Кг у. т./т	Дни
1	556,5	1	0,00	285	20
2	519,4	1	0,00	260	250
3	464,2	1	0,00	250	350
4	439,5	1	0,00	240	380
5	373,6	1	0,00	230	400
6	283,7	24	1,47	220	380
7-базисный	265,5	226	1,43	210	380
8	254,1	107	1,13	200	380
9	238,0	2	0,82	200	380
10	222,6	1	0,00	200	380
				2010 г.	
Номер класса	Среднее удельное значение расхода ТЭР класса, кг у. т./т	Количество дней в классе, сут	Чистота класса, %	Кг у. т./т	Дни
1	755,4	1	0,00	265	20
2	424,0	1	0,00	250	250
3	304,6	1	0,00	240	350
4	283,7	1	0,00	230	380
5	263,8	82	1,38	220	380
6	250,1	4	1,10	210	380
7	232,7	81	2,60	200	380
8	205,4	155	2,74	200	380
9	177,6	2	3,42	200	380
10	146,1	35	4,65	200	380

Если сравнить ЭЭФ между базисным классом и дополнительным классом № 9, то рост ЭЭФ производства составил:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (196,3 - 221,6) / 221,6 \cdot 100 \% = -11 \% \text{ (экономия)}.$$

Временная емкость базисного режима в 2012 г. составила 119 суток, или 32 % от годового количества дней, а второго базисного режима – 109 суток, или 29 % от общего количества дней. Фактически 62 % годового времени производство отработало с энергоэффективностью – 8 % и 26 % времени с энергоэффективностью – 11 % относительно режимов 2011 г.

Таким образом, кластерный анализ (структурная группировка) удельных расходов ТЭР на производство листового стекла позволил оценить рост энергоэффективности производства с 2009 по 2012 г. с вводом в эксплуатацию новой технологической линии Л2.

С использованием структурной модели удельных расходов ТЭР может быть произведена оценка потенциала роста ЭЭФ за счет увеличения загрузки технологических линий.

Наиболее эффективной с точки зрения удельных расходов ТЭР является модель с нижним расположением базисной ступени. Среднее удельное значение расхода ТЭР данного типа модели является минимальным, а значит более эффективным по отношению к другим режимам. Анализ структурных моделей удельных расходов ТЭР за 2009–2012 гг. позволил установить, что в 2009 г. структурная модель удельных расходов ТЭР относилась к виду со средним расположением базисной ступени. В 2010–2011 гг. структурные модели имели вид с дроблением ступеней, а в 2012 г. структурная модель удельных расходов ТЭР приняла вид со средним расположением базисной ступени.

В 2009 г. в условиях увеличения загрузки технологической линии Л1 вид модели трансформировался в модель с нижним расположением базисной ступени и рост ЭЭФ производства листового стекла мог составить:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (254,1 - 265,5) / 265,5 \cdot 100 \% = -4,29 \text{ (экономия)}.$$

Базисный класс включал бы в себя 333 дня, что объединяло около 91 % от всех рабочих дней периода.

В 2010 г. из-за пуско-наладочных работ, связанных с запуском линии Л2, структурная модель имеет вид *с дроблением ступеней*.

Своевременное увеличение загрузки линии Л2, введенной в эксплуатацию в 2010 г., позволило бы обеспечить рост энергоэффективности:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (221,6 - 225,9) / 225,9 \cdot 100 \% = -1,9 \% \text{ (экономия)}.$$

Базисная ступень при этом объединяла 206 дней, или 56 % от общего расчетного периода. В этих условиях модель трансформировалась в модель с нижним расположением базисной ступени.

Увеличение загрузки технологической линии Л2 в 2012 г. обеспечило бы переход на более эффективную базисную ступень. Рост ЭЭФ производства в этих условиях составил:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (199,9 - 202,3) / 202,3 \cdot 100 \% = -1,2 \% \text{ (экономия)}.$$

Базисная ступень при этом объединяла 228 дней, или 62,5 % от всего периода работы линии Л2.

Таблица 2

Результаты кластеризации (структурного анализа) суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла

Номер класса	Среднее удельное значение расхода ТЭР класса, кг у. т./т	Количество дней в классе, се, сут	Чистота класса, %	2011 г.	
				Кг у. т./т	Дни
1	235,1	12	0,40	235,1	12
2	230,6	55	0,53	230,6	55
3	225,9	99	0,62	225,9	99
4	221,6	107	0,49	221,6	107
5	217,0	73	0,75	217,0	73
6	212,4	8	0,40	212,4	8
7	208,6	1	0,00	208,6	1
8	197,6	2	0,50	197,6	2
9	169,8	1	0,00	169,8	1
10	160,6	1	0,00	160,6	1

Номер класса	Среднее удельное значение расхода ТЭР класса, кг у. т./т	Количество дней в классе, се, сут	Чистота класса, %	2012 г.	
				Кг у. т./т	Дни
1	213,3	2	0,06	213,3	2
2	211,5	6	0,28	211,5	6
3	209,1	8	0,35	209,1	8
4	206,8	4	0,19	206,8	4
5	205,1	15	0,25	205,1	15
6	202,3	119	0,42	202,3	119
7	199,9	109	0,33	199,9	109
8	197,9	72	0,25	197,9	72
9	196,3	24	0,20	196,3	24
10	194,6	6	0,11	194,6	6

Из представленных расчетов видно, что наибольшую энергоэффективность можно было достичь в 2009 г. С увеличением времени эксплуатации технологической линии в структурной модели удельных расходов ТЭР между базисной и дополнительными ступенями появляется больший разброс, что обусловлено как нестабильностью режимов потребления ТЭР, так и снижением их эффективности вследствие старения футеровки печи и другого оборудования технологической линии.

Ввод в эксплуатацию в 2010 г. технологической линии Л2 позволил увеличить ЭЭФ производства листового стекла на 22 %.

Заключение

Оценка ЭЭФ ввода в эксплуатацию новой технологической линии Л2 производилась по удельным значениям суммарных энергозатрат на производство листового стекла (газ и электроэнергия, приведенные к условному топливу, т у.т.).

Для оценки ЭЭФ ввода в эксплуатацию современной технологической линии Л2 производства листового стекла может быть использован аппарат кластерного анализа, а именно структурный анализ суточных удельных расходов ТЭР на выпуск продукции.

Полученные в результате кластеризации структурные модели суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла позволяют:

- выделять базисные режимы работы технологической линии;
- оценивать потенциал повышения ЭЭФ;
- выполнить анализ нестандартных (как по количеству дней, так и удельному расходу ТЭР) режимов работы производства;
- оценить эффект от внедренных технологических мероприятий. Эффективность производства стекла от ввода в эксплуатацию технологической линии Л2 составляет 22 %.

Структурные модели удельных расходов ТЭР производства листового стекла имеют вид: 2009 г. – модель со средним расположением базисной ступени; 2010–2011 гг. – модель с дроблением ступеней (из-за отладки режимов); 2012 г. – модель со средним расположением базисной ступени.

Своевременный анализ режимов работы технологической линии за предшествующий период дает прогнозную оценку режима работы текущего года и принять меры для роста ЭЭФ.

Литература

1. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
2. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким [и др.]. – М. : Финансы и статистика, 1989.
3. Токочакова, Н. В. Определение договорных значений мощности и прогнозная оценка электропотребления рабочих суток промышленных потребителей региона : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Н. В. Токочакова ; МЭИ. – М., 1990 – 19 с.
4. Токочакова, Н. В. Структурное моделирование суточного электропотребления промышленных предприятий энергосистемы для быстрой оценки электросбережения / Н. В. Токочакова, В. И. Токочаков, Т. В. Алферова // Энергоэффективность. – 2001. – № 2. – С. 18–21.

Получено 10.10.2013 г.