

# Структурное моделирование суточного электропотребления промышленных предприятий энергосистемы для быстрой оценки потенциала энергосбережения

Н.В. Токочакова, к.т.н.,  
В.И. Токочаков, к.т.н.,  
Т.В. Алферова, к.т.н.,  
Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Сегодня проблема энергосбережения для Беларуси — одна из главнейших. Это определяется недостатком собственных энергетических ресурсов и зависимостью их поставок из России. Вместе с тем, несмотря на снижение объемов производства, материалоемкость и энергоёмкость продукции возросли. Доля промышленности от общего потребления электрической энергии составляет более 60%, сельского хозяйства — 11-12%, а городского и сельского населения — около 15%. Поэтому усилия по экономии ТЭР должны, в первую очередь, предприниматься промышленными предприятиями. Такой подход определяется еще и тем, что есть немало предприятий, которые при снижении объемов производства в 2-3 раза снижают свое годовое потребление электрической энергии лишь на 15-20%, в результате чего происходит увеличение удельных расходов ТЭР на выпуск продукции. Стоимость энергоносителей закладывается в себестоимость продукции и в конечном итоге определяет ее цену. Выход из такой ситуации возможен либо при условии расходования все большего и большего количества энергоресурсов на выпуск продукции, что требует увеличения добычи топлива, строительства новых электростанций, линий электропередач, либо при снижении потребления электроэнергии путем внедрения в промышленность энергосберегающих техники и технологий. По оценкам специалистов, затраты средств для Беларуси при реализации первого пути в 2-3 раза выше, чем при реализации второго. Следует учесть, что энергетический кризис 70-80-х годов, охвативший высокоразвитые страны Западной Европы, США, Японии заставил их переориентироваться на второй путь и достичь при этом значительных результатов.

Переход промышленности к энергосбережению требует переориентации нашего сознания. Поэтому весьма актуальной является задача создания системы энергетического менеджмента (управления) на промышленных предприятиях. Нельзя компетентно уп-

равлять предприятием без необходимой информации о состоянии объекта управления. Важным является и скорость переработки информации. **А проведение энергетических аудитов на промышленных предприятиях является одним из первых шагов в реализации политики энергосбережения.**

Цель энергетического аудита — анализ структуры энергопотребления на предприятии и оценки потенциала энергосбережения. Однако здесь возникает вопрос: **как при количественном и технологическом многообразии промышленных потребителей региона выявить группы, работа с которыми в области энергосбережения может дать наибольший эффект?** Решение этой задачи с позиций региональных центров энергосбережения возможно с использованием статистической информации по суточному электропотреблению на годовом временном интервале. Такая информация поступает в областные отделения энергонадзора и используется для решения внутренних задач. На сегодняшний день не существует методов обработки суточного электропотребления предприятий и использования полученных результатов для задач энергетического аудита. В то же время достоверность значений  $A_{сут}$  является высокой, поскольку сами по себе данные относятся к интегральным показателям процесса электропотребления за временной интервал, соответствующий двадцати четырем часам. Для получения информации по  $A_{сут}$  достаточно счетчиков электрической энергии. Использование такого богатого статистического материала становится возможным только при создании базы данных по потребителям и при внедрении современных математических методов обработки и анализа полученной информации.

Предлагается методика анализа суточного электропотребления и выявления групп, работа с которыми в области энергосбережения даст наибольший эффект. Она базируется на обработке статистической информации по суточному электропотреблению, накоп-

ленной в базе данных по промышленным предприятиям энергосистемы с использованием аппарата теории распознавания образов (кластерный анализ). Следует отметить, что кластерный анализ широко используется в энергосистемах Франции для решения задач классификации нагрузок потребителей и прогнозирования их на перспективу.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

— сформирована информационная база данных по электрическим показателям восьмидесяти крупнейших промышленных предприятий региона;

— разработаны структурные модели суточного электропотребления предприятий с помощью кластерного анализа; произведена оценка временной устойчивости структурных моделей и выполнен расчет основных параметров моделей;

— выделена группа предприятий, работа с которыми в области энергосбережения может дать максимальный эффект.

Кластерный анализ (структурная группировка) представляет собой методологию проведения классификации неоднородных статистических данных. Целью анализа является выделение в исходных многомерных данных однородных подмножеств, чтобы объекты внутри групп были похожи друг на друга, а объекты из разных групп — нет. **Применительно к задаче классификации суточного электропотребления предполагается разбиение качественно однородной совокупности суточного электропотребления на группы, объединяющие дни с близкими значениями электропотребления.** При разбиении данные, подлежащие анализу, не снабжены метками, указывающими на принадлежность к классу. Поэтому классификацию логично выполнить с помощью иерархической схемы кластерного анализа. Иерархическая группировка обладает следующим свойством: если на некотором уровне объединения два объекта попадают в один кластер, то они остаются в этом кластере и на более высоких уров-

нях. Принцип организации иерархической схемы кластеризации заключается в следующем: на первом шаге каждый объект считается отдельным классом, производится оценка меры сходства между классами, и следующим шагом является объединение ближайших объектов в один класс. Далее процедура повторяется, пока все объекты не объединяются в один класс. Этот способ кластеризации в математике называется методом «ближайших соседей». Принятая мера сходства между объектами при классификации по одному признаку рассчитывается по формуле:

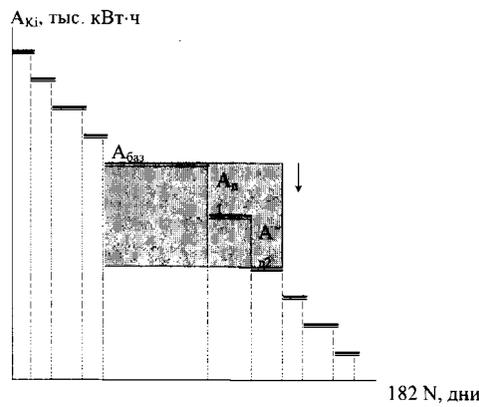
$$R_{KiKj} = \sqrt{(M_{Ki} - M_{Kj})^2},$$

где  $M_{Ki}$  — среднее значение  $A_{сут}$  по классу  $Ki$ ;  
 $M_{Kj}$  — среднее значение  $A_{сут}$  по классу  $Kj$ .

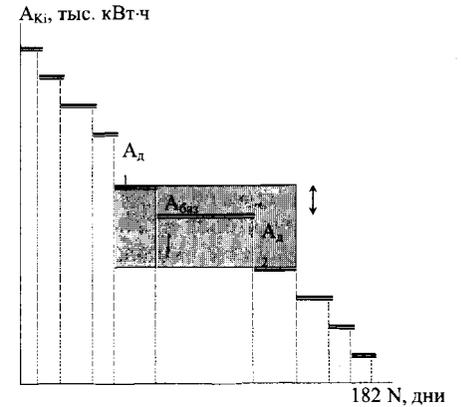
Важнейшим моментом при проведении классификации является обоснование принятого числа классов. За базисное разбиение принято то, у которого коэффициент вариации  $V=(\sigma/M) \cdot 100\%$  самого емкого по дням класса не превышает 3-5%. Полученные в результате кластеризации  $A_{сут}$  классы позволяют оценить неравномерность электропотребления и выявить потребителей нерационально использующих электроэнергию. Для учета сезонной специфики электропотребления классификация выполняется отдельно для осенне-зимнего (I и IV кварталы) и весенне-летнего (II и III кварталы) периодов. Каждый класс характеризуется средней величиной электропотребления ( $A_{Ki}$ ), количеством суток, вошедших в него ( $N_{Ki}$ ), и величиной коэффициента вариации. Если по оси Y отложить  $A_{Ki}$ , а по оси X — количество суток, вошедших в него, — получим структурную модель суточного электропотребления (рис.1).

У структурных моделей ПП с одно-двух-сменным режимом работы характерно наличие «хвоста», объединяющего воскресные, нерабочие и праздничные дни предприятия. Временная емкость указанного класса составляет порядка 30% от общего количества дней расчетного периода (осенне-зимнего и весенне-летнего). За базисную ступень в структурной модели принимается ступень, включающая максимальное количество рабочих дней расчетного периода (от 40% до 80%).

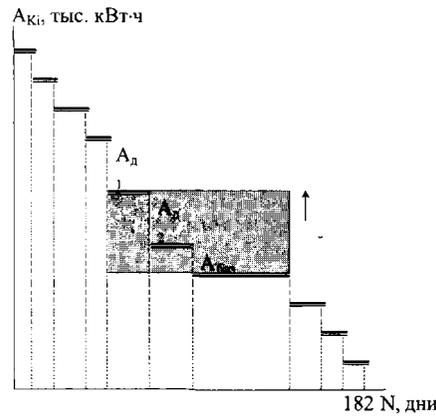
Рабочая часть структурной модели, объединяющая рабочие дни предприятия, может



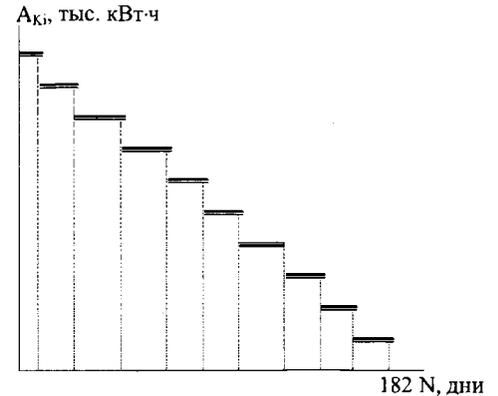
а) модель с верхним расположением базисной ступени;



б) модель со средним расположением базисной ступени;



в) модель с нижним расположением базисной ступени;



г) модель с дроблением ступеней

Рис. 2. Структурная модель суточного электропотребления предприятия

быть представлена четырьмя видами (рис.2): а) с верхним расположением базисной ступени; б) со средним расположением базисной ступени; в) с нижним расположением базисной ступени; г) модель с дроблением ступеней. Кроме базисной ступени можно выделить две-три дополнительные, примыкающие к базисной, по которым определяется возможность безущербного регулирования электропотребления предприятия и общая неравномерность электропотребления. Чем больше временная емкость базисного класса и меньше величина отклонения среднесуточного электропотребления дополнительных классов относительно базисной ступени, тем отлаженнее у предприятия технологический процесс, и тем стабильнее оно работает.

Регулировочная способность предприятия определяется особенностями технологического процесса, сезонным фактором и заключается в возможности безущербного снижения (повышения) электропотребления на таких временных интервалах, как дни недели, декады месяца, половины месяца, месяц. Структурная группировка суточного электропотребления позволяет дать такую оценку. Предварительная оценка возможного регулирования параметров электропотребления дается по виду рабочей части кривой структурной группировки. Так, предприятия, имеющие вид структуры с предельно верхним расположением базисной ступени, регулируют свои параметры только в сторону их снижения. У потребителей со средним расположением базисной ступени возможно как повышение, так и снижение электропотребления, а значит, в течение месяца может быть дискретное (ступенчатое) повышение значений электропотребления от начала к концу. Для потребителей, имеющих третий вид структурной модели (с предельно нижним расположением базисной ступени), возможно только скачкообразное повышение указанных параметров на коротких временных интервалах. Необходимо отметить одну интересную особенность: структурные модели промышленных предприятий 1985-1990гг. отличались устойчивостью вида, поэтому, как правило, устойчивыми были и удельные расходы электрической энергии по видам про-

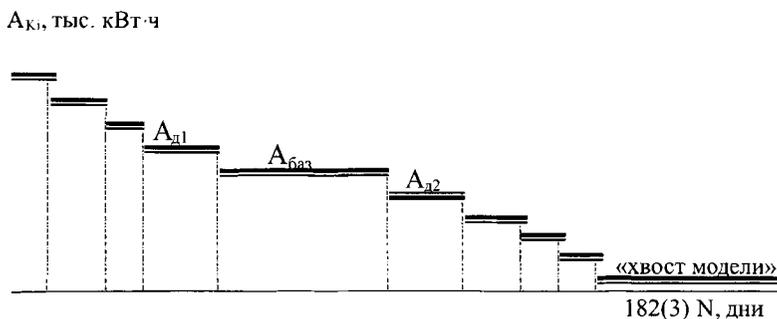


Рис. 1. Структурная модель суточного электропотребления предприятия

дукции (небольшое снижение по годам). С 90-х годов появился и четвертый вид модели — модель с дроблением ступеней, у которой невозможно выделить базисный класс. Такой вид модели характерен для нестабильно работающего либо неотлаженного производства. **Предприятия, имеющие данный вид модели, должны стать объектом пристального внимания аудиторов и, в первую очередь, администрации и технологов. Такие предприятия будут иметь сложности при нормировании расхода ТЭР по видам продукции, так как отличаются моновариантностью режимов, учесть которые не представляется возможным с использованием существующих методик нормирования.**

При определении регулировочной способности по электропотреблению и оценке неравномерности структуры электропотребления основными показателями являются:

— регулировочная способность потребителя. Определяется как отношение разности величин электропотребления дополнительного и базисного класса:

$$\frac{|A_{Ki} - A_{баз}|}{A_{баз}} \cdot 100\% ;$$

— отношение числа рабочих суток класса к общему их количеству за расчетный период:

$$\frac{N_{Ki}}{N_p} \cdot 100\%$$

В табл. 1 приведены параметры структурных моделей Гомельского завода «Центролит» за осенне-зимний период 1987, 1990 и 1992 гг. Как видно из рис. 3 и данных таблицы 1, наиболее устойчивые режимы электропотребления отмечены в 1987 г.: базисный класс занимает верхнее расположение, временная емкость базисного класса составила 122 дня или 67% от общего количества дней периода. Уже в 1990 г. произошло дробление базисного класса: появилось два дополнительных класса, снизилась временная емкость базисного класса до 76 дней. Повысилась и величина средне-суточного электропотребления базисного класса до 276,9 тыс. кВт·ч. В пределах базисного и двух дополнительных классов неравномерность среднесуточного электропотребления и возможность его регулирования без ущерба для производства можно оценить как +6,9% — (-10,8%). Уже в 1992 г. структурная модель предприятия трансформировалась к виду модели с дроблением ступеней и невозможностью выделения базовых режимов электропотребления. **Таким образом, анализ структурных моделей суточного электропотребления предприятия позволяет:**

— выделить базовые режимы электропотребления и, при устойчивости вида модели, прогнозировать их параметры;

— оценить возможность безущербного регулирования электропотребления в границах базисного и дополнительных классов;

— дать оценку сезонной составляющей электропотребления (при сравнении струк-

турных моделей за осенне-зимний и весенне-летний периоды);

— уточнить электропотребление выходных и праздничных дней предприятия.

В табл. 2 приведены данные обработки структурных моделей суточного электропотребления за осенне-зимний период одного года случайной выборки из двадцати одного промышленного предприятия, суточное электропотребление которых содержится в базе данных. Каждое предприятие имеет свой код — порядковый номер в базе данных. В выборку вошли следующие предприятия: Белорусский газоперерабатывающий завод, «Эмальпосуда», ПКФ «8 Марта», Бумлесохимзавод, ПО «Гомельдрев», «Гомсельмаш», ГПЗ-12, ПО «Измеритель», завод «Центролит» и др.

Результаты статистической обработки показали следующее: девять предприятий имеют модель с дроблением ступеней, что составляет 43% исследуемой выборки предприятий; 19% предприятий выборки имеют модель с верхним расположением базисной ступени; 24% имеют модель со средним расположением базисной ступени и 14% — с нижним расположением базисной ступени.

Временная емкость основных классов всей группы составляет 62-66% от общего количества дней периода. Электропотребление основных классов составляет 70-80% от суммарного электропотребления предприятий за осенне-зимний период. Предприятие под кодом «11» может представлять наибольший интерес для аудиторов как имеющее наибольший разброс су-

Таблица 1

Параметры структурных моделей за осенне-зимний период Гомельского завода «Центролит»

№ класса	Год классификации - 1987				Год классификации - 1990				Год классификации - 1992			
	А <sub>Ki</sub> , тыс. кВт·ч	N <sub>Ki</sub> , дни	V, %	W <sub>Ki</sub> /W <sub>св</sub> *100%	А <sub>Ki</sub> , тыс. кВт·ч	N <sub>Ki</sub> , дни	V, %	W <sub>Ki</sub> /W <sub>св</sub> *100%	А <sub>Ki</sub> , тыс. кВт·ч	N <sub>Ki</sub> , дни	V, %	W <sub>Ki</sub> /W <sub>св</sub> *100%
1	378,5	2	0	1,8	434	1	0	1	285,9	7	2,2	6,5
2	313,1	5	2,7	3,7	356	1	0	0,8	261,2	36	3,9	30,6
3	<b>270,1</b>	<b>122</b>	<b>4,2</b>	<b>78,9</b>	<b>306,6</b>	<b>26</b>	<b>1,6</b>	<b>18,2</b>	224,2	18	2,2	13,1
4	240,8	1	0	0,6	<b>286,9</b>	<b>76</b>	<b>2,1</b>	<b>49,7</b>	175,9	35	6,4	20
5	202,9	2	2	1	<b>255,7</b>	<b>21</b>	<b>3,7</b>	<b>12,2</b>	148,1	15	2,6	7,2
6	179,4	5	3,5	2,1	220,5	7	1,6	3,5	124,1	30	4,4	12,1
7	137,7	13	3,1	4,3	198	2	2,9	0,9	97,5	20	5	6,3
8	103,8	27	8,6	6,7	156,2	10	5,7	3,6	67,6	16	11	3,5
9	81,2	4	3,7	0,8	123,7	24	4,6	6,8	38,3	4	25,5	0,5
10	42,9	1	0	0	103,5	14	7,2	3,3	6,4	2	75,1	0
<b>Итого:</b>	<b>41892,9</b>	<b>182</b>		<b>100</b>	<b>43852,7</b>	<b>182</b>		<b>100</b>	<b>30738</b>	<b>183</b>		<b>100</b>

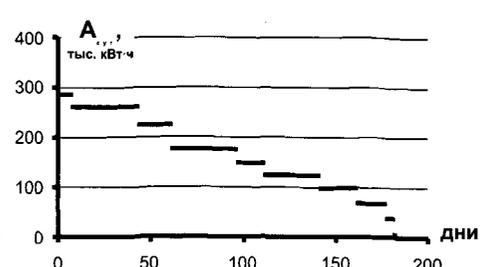
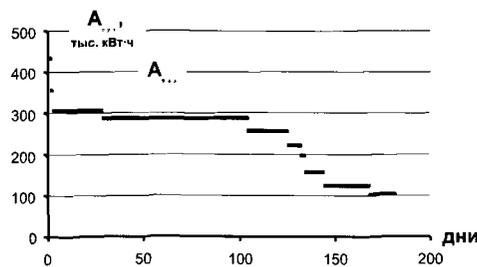
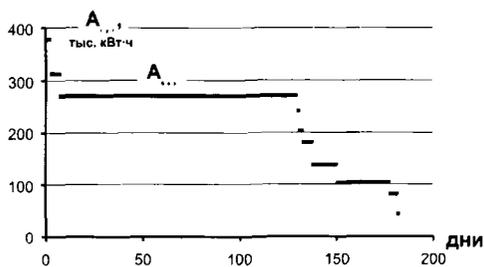


Рис. 3. Структурные модели суточного электропотребления завода «Центролит» за 1987, 1990, 1992 гг.

Характеристики структурных моделей группы предприятий

Код предприятия	Характеристики базисного класса		Характеристики дополнительных классов				Временная емкость основных классов, %	Электропотребление основных классов от суммарного, %
	$A_{баз}$ , тыс. кВт·ч	Временная емкость $N_б$ , %	$A_{д1}$ , тыс. кВт·ч	Регулир. $A_{д1}$ , %	$A_{д2}$ , тыс. кВт·ч	Регулир. $A_{д2}$ , %		
<b>Верхнее расположение базисной ступени</b>								
02	21,0	37,9	20,0	-4,8	18,3	-12,9	62,0	82,1
10	35,0	40,0	27,3	-22,0	20,8	-40,6	62,0	77,0
11	7,3	30,7	3,9	-46,6	2,6	-64,4	66,4	70,8
17	80,5	54,9	68,7	-14,7	59,0	-26,7	64,3	78,2
<b>Среднее расположение базисной ступени</b>								
05	24,4	13,7	30,7	25,8	18,5	-24,2	36,0	73,0
08	34,5	60,0	-	-	-	-	60,0	78,4
18	20,8	21,9	24,2	16,3	18,6	-10,6	44,0	64,3
21	40,7	35,1	46,4	14,0	35,3	-13,3	63,1	88,7
30	114,3	22,5	132,4	15,8	85,1	-25,5	47,8	84,1
<b>Нижнее расположение базисной ступени</b>								
01	17,1	30,2	24,8	45,0	32,4	89,5	44,5	51,2
04	62,2	41,2	117,2	88,4	149,0	139,5	66,4	39,4
07	35,4	34,0	39,4	11,3	43,2	22,0	64,8	90,2

точного электропотребления дополнительных классов. Из второй группы со средним расположением базисной ступени следует обратить внимание на предприятие с кодом «8», которое отличается высокой стабильностью своих параметров электропотребления. У данного предприятия базисный класс составляет 78,4% от общего электропотребления за период. А наибольший диапазон регулирования параметров суточного электропотребления отмечен у предприятия с кодом «5»: 25,8% в сторону снижения электропотребления и 24,2% в сторону повышения электропотребления. У группы с нижним расположением базисной ступени в худшей ситуации, с точки зрения режимов электропотребления, является предприятие с кодом «4». У данного предприятия повышение электропотребления верхнего класса от базисной ступени составляет 139,5%. Электропотребление базисных классов от суммарного за период невелико — 39,4%.

В табл. 3 представлены параметры структурных моделей предприятий с дроблением ступеней. Эта группа предприятий должна в первую очередь стать объектом пристального внимания как аудиторов, так технологов и администрации, поскольку нет возможности выделить базисные классы — базовые режимы. Отношение среднесуточного электропотребления верхних классов к нижним составляет в максимуме 5,95, в минимуме — 1,12. Причем 8-6 выделенных классов из 10 являются равноценно емкими по дням, что указывает на многообразие режимов электропотребления. Временная емкость указан-

Характеристики структурных моделей предприятий с дроблением ступеней

Таблица 3

Код предприятия	Максимальное среднесуточное электропотребление, $A_{max}$ , тыс. кВт·ч	Минимальное среднесуточное электропотребление, $A_{min}$ , тыс. кВт·ч	$h = \frac{A_{max}}{A_{min}}$	Временная емкость границы $N_{max} - N_{min}$ , %
03	404,2	114,0	3,55	93,4
06	71,3	20,3	3,51	82,7
09	161,2	71,6	2,25	89,0
12	31,1	16,1	1,93	89,0
13	10,6	2,7	3,95	73,6
14	57,1	9,6	5,95	74,1
15	198,2	51,6	3,84	81,3
16	309,4	111,8	2,77	82,9
74	123,5	110,5	1,12	95,6

ных классов составляет от 73,4% до 96% от общего количества дней периода.

### Выводы:

1. Создание информационных баз данных по суточному электропотреблению промышленных потребителей региона позволит применить самые современные математические методы обработки информации, такие, как теория распознавания образов — кластерный анализ.

2. Полученные с помощью кластерного анализа структурные модели суточного

электропотребления могут быть использованы для выделения базовых режимов электропотребления, оценки безущербного регулирования электропотребления в границах базисного и дополнительных классов, выявления сезонной составляющей электропотребления (при сравнении структурных моделей за осенне-зимний и весенне-летний периоды).

3. Группа промышленных потребителей, имеющих структурную модель с дроблением ступеней, должна стать объектом пристального внимания как независимых аудиторов, так и своей администрации.