

УДК 62.1+681.51+519.9+53.072+621.311.28

Оптимальное управление электропотреблением техноценоза методами рангового анализа

В.И. Гнатюк*

*Калининградский государственный технический университет,
Россия 236011, Калининград, бульвар Южный, д. 30¹*

Received 6.05.2009, received in revised form 27.05.2009, accepted 17.06.2009

Основу энергосбережения составляет планомерная реализация широкого комплекса технических и технологических мер, которые должны осуществляться в рамках процедур оптимального управления электропотреблением инфраструктуры на системном уровне. Целью управления являются упорядочение электропотребления объектами инфраструктуры, экономия направленных на оплату за потребленную электроэнергию средств, полученная за счет организационных мероприятий, а также создание научно обоснованных предпосылок для проведения целенаправленных углубленных энергетических обследований с последующей реализацией технических и технологических мер по энергосбережению. Под инфраструктурой в данном случае понимается техноценоз (регион в целом, город, район, крупное предприятие, фирма, район нефте- и газодобычи, аграрная инфраструктура, группировка войск, сеть магазинов или заправочных станций и т.п.). В качестве основного метода решения задач оптимального управления электропотреблением техноценоза выступает ранговый анализ, позволяющий в процессе энергосбережения задействовать системный уровень оперативного и структурного управления, который ранее не использовался. При этом в реальном масштабе времени осуществляются процедуры формирования базы данных по электропотреблению, выявления аномальных объектов, прогнозирования и нормирования. Это дает возможность техноценозу извлекать из процесса энергосбережения дополнительные конкурентные преимущества и ресурсы экономии. Уже первый (организационный) этап реализации предлагаемой методики позволяет экономить до 10 – 15 % от объемов ежегодных выплат за потребляемую электроэнергию без капитальных вложений. Последующее внедрение энергосберегающих технологий и технических решений еще больше увеличивает экономию. В свою очередь, менеджмент техноценоза получает инструментарий, позволяющий эффективно управлять электротехническим комплексом в условиях развивающейся инфраструктуры.

Ключевые слова: техноценоз, оптимальное управление электропотреблением, ранговый анализ, тонкие процедуры рангового анализа, база данных, интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование, дифлекс-анализ, GZ-анализ, коэффициент когерентности, ASR-анализ.

Методология оптимального управления

Общая методология исследований в области энергосбережения в соответствии с введенной ранее стратификацией [1-5] может быть условно разделена на три уровня (рис. 1). Первый уровень соответствует исследованиям, нацеленным на конкретные технические и технологические

* Corresponding author E-mail address: gnatukvi@mail.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved



Рис. 1. Методологические уровни исследований в области энергосбережения

разработки, способствующие снижению объемов электропотребления (светотехника, арматура, электропривод, электротехнологии и т.д.). В основе методологии здесь лежит имитационное моделирование, которое базируется на аксиоматике гауссовых распределений. На третьем уровне осуществляются стратегическое планирование и прогнозирование в электроэнергетике (оперативное управление, маневрирование максимумами нагрузки, регулирование потоков реактивной мощности и т.д.). Здесь находит применение методология исследования операций, которая в основном базируется на гауссовых эвристических и алгоритмических процедурах.

Связующим звеном служит промежуточный (второй) уровень исследований в области энергосбережения, на котором осуществляется оптимизация электропотребления техноценозов в целом. В качестве методологической основы на этом уровне применяется ранговый анализ. Именно этот уровень является ключевым при построении методологии оптимального управления электропотреблением. Он рассматривается как системный по отношению к уровню исследований, касающихся конкретных технических и технологических решений в области энергосбережения [4].

Оптимизация электропотребления на системном уровне осуществляется в рамках связанной методики, включающей ряд этапов (рис. 2) [4; 6]. На этапе анализа электропотребления техноценоза по специально разработанным формам запроса ведется сбор данных о потребителях электроэнергии. Это позволяет получить развернутую картину электропотребления (с историей на глубину 5 – 6 лет и более), выявить объекты, которые обеспечиваются электроэнергией с нарушением существующих организационно-технических требований, подготовить электронную базу данных для многофакторного анализа. Рекомендуется собранные данные представлять в виде информационно-аналитического комплекса [4; 7].

Информационно-аналитический комплекс «Модель оптимального управления электропотреблением техноценоза» представляет собой развитую базу данных по электропотреблению объектов техноценоза, включающую банк и систему управления данными, а также расчетные и графические модули. Комплекс может успешно использоваться при планировании и прогнозировании, а также позволяет оперативно отслеживать информацию о потребителях электроэнергии, обновлять исходные данные для анализа в реальном масштабе времени. По запросу оператора из базы данных может быть получена информация о потребителях электроэнергии с необходимой степенью визуализации, детализации и обобщения.

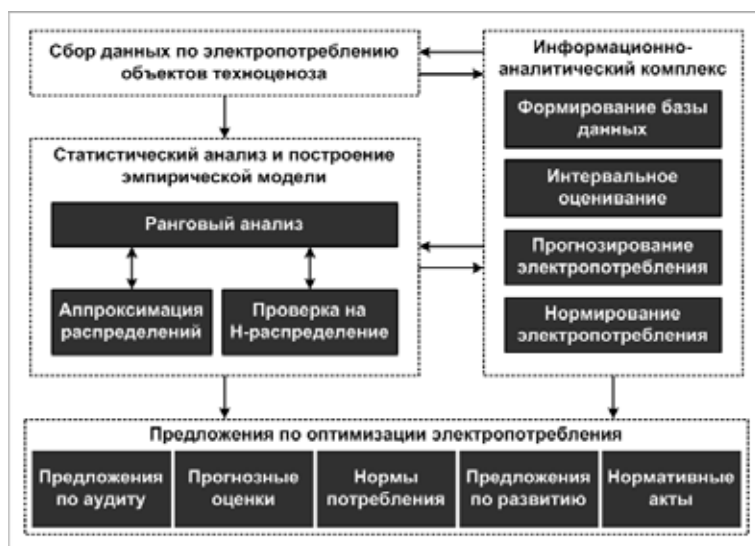


Рис. 2. Методика оптимального управления электропотреблением техноценоза

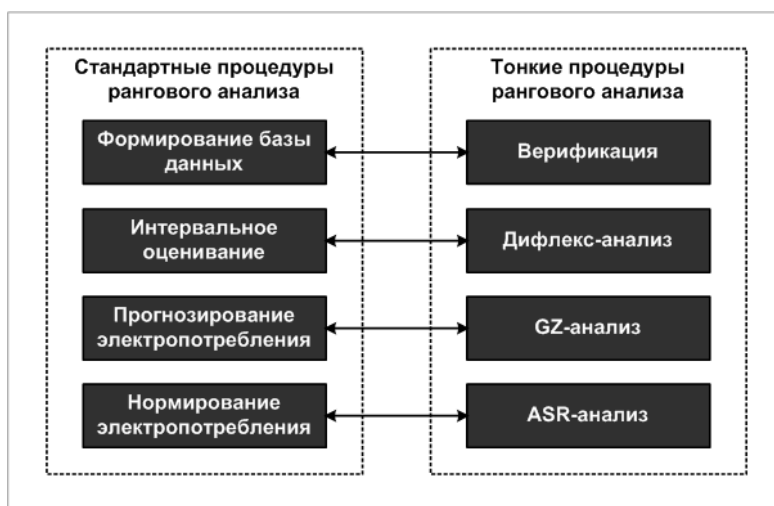


Рис. 3. Тонкие процедуры рангового анализа

На этапе статистического анализа и построения эмпирической модели процесса электропотребления техноценоза осуществляется полномасштабная статистическая обработка данных по электропотреблению, которая включает взаимосвязанные процедуры рангового анализа. Данные процедуры позволяют упорядочивать информацию, выявлять в динамике и наглядно представлять объекты с аномальным электропотреблением, эффективно осуществлять прогнозирование электропотребления отдельными объектами и техноценозом в целом, а также разбивать объекты по группам и нормировать электропотребление в каждой группе с подробным статистическим описанием норм.

С целью повышения точности расчетов стандартные процедуры рангового анализа дополняются соответствующими тонкими процедурами: верификацией базы данных, а также дифлекс-, GZ-, ASR-анализом рангового параметрического распределения (рис. 3).

В основе рангового анализа лежат техноценологический подход и теория безгранично делимых ранговых распределений [1]. Ранговые распределения получают по результатам аппроксимации отранжированных экспериментальных данных по электропотреблению объектов техноценоза. При выделении объекта реализации методологии оптимального управления электропотреблением следует обращать внимание на корректность базы данных по электропотреблению, а также на ее строгое соответствие статистическим критериям H -распределения [1; 3; 4; 7]. Оценка корректности базы данных осуществляется в рамках первой тонкой процедуры рангового анализа – верификации (рис. 3).

Как показывает опыт, далеко не всегда исходные данные, используемые для управления электропотреблением техноценоза, оказываются вполне корректными, что значительно снижает достоверность интервального оценивания, прогнозирования и нормирования. Следовательно, требуется предварительная верификация базы данных, которая включает процедуры: 1) устранение нулевых данных; 2) устранение явно ошибочных данных (выбросов); 3) устранение абсолютно равных данных; 4) восстановление утерянных данных; 5) проверка на H -распределение. Нулевые и абсолютно равные данные являются первым признаком некорректности базы, что очевидно даже с точки зрения физического смысла. Кроме того, подобные данные очень плохо обрабатываются компьютерными программами. Выбросы в данных есть следствие грубых ошибок при фиксации параметров обслуживающим персоналом либо сбоев в работе технических средств измерений. Наконец, утеря данных может произойти как по вине персонала, так и по причине тяжелых сбоев в работе серверов, на которых хранятся базы. В ряде случаев требуется просто корректное наращивание базы данных на несколько лет «назад». Необходимо отметить, что верификация не обязательная процедура, однако она всегда должна применяться в том случае, если есть хотя бы малейшее сомнение в корректности исходных данных. Подробно верификация базы данных рассмотрена на конкретном примере в [4].

Проверка соответствия данных критериям H -распределения заключается в проверке совместного выполнения двух гипотез. Во-первых, совокупность данных не подчиняется нормальному закону, во-вторых, данные значимо взаимосвязаны. Если обе гипотезы выполняются, можно утверждать, что исследуемый объект является техноценозом, и его данные по электропотреблению могут обрабатываться методами рангового анализа. Проверка гипотезы о несоответствии генеральной совокупности данных по электропотреблению нормальному распределению осуществляется при помощи критерия Пирсона, а также методом спрямленных диаграмм. Исследование взаимосвязанности техноценоза выполняется с помощью коэффициента конкордации, выборочного коэффициента ранговой корреляции Кендалла, а также выборочного коэффициента линейной корреляции. Методика расчетов и интерпретация соответствующих параметров изложены в работах [7-10]. Кроме того, подробно данная процедура рассмотрена в [4].

Как показано в [4], строго математически каждое ранговое распределение в графической форме представляет собой совокупность точек, получаемых по эмпирическим данным. Точки – результат анализа табулированного рангового распределения техноценоза. С точки зрения последующей оптимизации большое значение имеет аппроксимация эмпирических распределений. Ее задача заключается в подборе аналитической зависимости стандартной гиперболи-

ческой формы, наилучшим образом описывающей совокупность точек (подробно процедура рассмотрена в [4]).

Интервальное оценивание

Ключевой процедурой рангового анализа является интервальное оценивание рангового параметрического распределения по функциональному параметру (в данном случае – электропотреблению) (рис. 4) [4].

По общему определению интервальное оценивание – процедура оптимального управления ресурсами техноценоза, заключающаяся в определении точек эмпирического рангового параметрического распределения по исследуемому функциональному параметру, выходящих за пределы гауссового переменного доверительного интервала, который построен относительно аппроксимационной кривой распределения. Точки, выходящие за пределы доверительного интервала, фиксируют объекты техноценоза, аномально потребляющие ресурс. При этом если точка находится ниже доверительного интервала, то считается, что объект потребляет ресурсы аномально мало, а если выше интервала, то аномально много. В обоих случаях объект нуждается в углубленном обследовании с целью установления причин его аномального состояния. Очевидно, что целью процедуры интервального оценивания в нашем случае является определение объектов техноценоза, аномально потребляющих электроэнергию.

Ранговое параметрическое распределение разбивается на ряд участков с таким расчетом, чтобы, во-первых, на каждом участке было не менее 10 – 12 точек, а во-вторых, отклонения значений экспериментальных параметров от соответствующих теоретических значений, определяемых аппроксимационной кривой, были распределены внутри участка по нормальному закону. Для каждого участка можно записать уравнение [6-8]:

$$\Delta/[\sigma(\Delta\theta)]=\Phi^{-1}(p_d/2), \quad (1)$$

где Δ – ширина доверительного интервала в одну сторону от аппроксимационной кривой;
 $\sigma(\Delta\theta)$ – среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от теоретической кривой (в расчетах принимается стандарт);

$\Phi^{-1}(\tau)$ – обратная функция Лапласа;

p_d – априорно принимаемая доверительная вероятность.

В (1) применяется стандартная функция Лапласа [8]:

$$\Phi(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\tau}e^{-x^2/2}dx. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) позволяет определить ширину доверительного интервала на каждом из участков разбиения. Последующая аппроксимация значений на границах участков дает переменный доверительный интервал распределения. Учитывая принятые допущения относительно экспериментальных точек, выходящих за пределы доверительного интервала, можно сделать следующие выводы. Если точка входит в доверительный интервал, то в пределах гауссового разброса параметров можно судить, что данный объект потребляет электроэнергию нормально для своего участка разбиения рангового распределения. Если точка находится ниже доверительного интервала, то это, как правило, свидетельствует о нарушении нормального

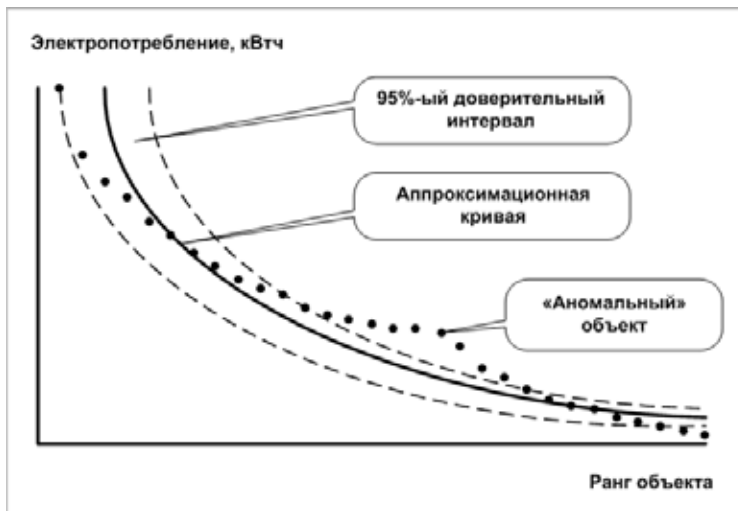


Рис. 4. Определение объектов с аномальным электропотреблением

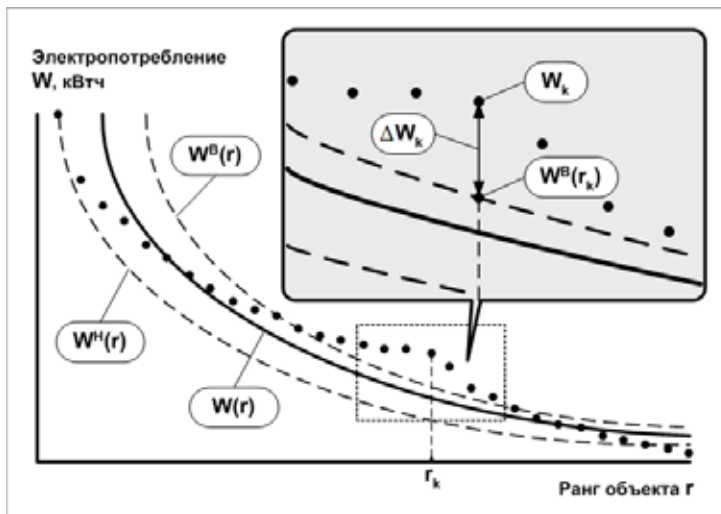


Рис. 5. К вопросу определения отклонения эмпирического значения электропотребления «аномального» объекта от верхней границы переменного доверительного интервала

технологического процесса электропотребления на данном объекте (частые отключения электроэнергии, неплатежи, избыточная экономия и т.п.). Если точка находится выше интервала, то на соответствующем объекте имеет место аномально большое потребление электроэнергии. Именно на эти объекты в первую очередь должно нацеливаться углубленное энергетическое обследование (энергоаудит). Последовательная (на протяжении ряда лет) реализация данной методологии совместно с оценением жизнеспособности объектов по электропотреблению [5; 6] позволит каждый раз целенаправленно воздействовать на наиболее «слабые» объекты, при этом средства, нацеленные на проведение энергетических обследований, будут расходоваться наиболее эффективно, а общее электропотребление техноценоза будет постоянно снижаться.

Для более тонкой настройки процедур управления электропотреблением на этапе интервального оценивания проводится дифлекс-анализ (Deflexion analysis) распределения (рис. 3 и 5).

Цель данной процедуры – разработать оптимальный план энергетических обследований «аномальных» объектов на среднесрочную перспективу (до 5 – 7 лет). При этом предполагается, что основным индикатором дифлекс-анализа является отклонение эмпирического значения электропотребления «аномального» объекта от верхней границы переменного доверительного интервала (рис. 5).

Очевидно, что с точки зрения методологии энергосбережения и оптимального управления электропотреблением наибольший интерес представляют «аномальные» объекты, электропотребление которых выше верхней границы переменного доверительного интервала. Из рис. 5 видно, что «степень аномальности» k -го объекта техноценоза с точки зрения его электропотребления в этом случае может характеризоваться абсолютным дифлекс-параметром:

$$\Delta W_k = W_k - W^B(r_k), \quad (3)$$

где W_k – электропотребление k -го объекта техноценоза;

$W(r)$ – ранговое параметрическое распределение объектов техноценоза по электропотреблению с рангом r ;

r_k – ранг k -го объекта на распределении $W(r)$;

$W^B(r_k)$ – значение электропотребления объекта, соответствующее k -му рангу на верхней границе переменного доверительного интервала.

В процессе анализа можно вести речь также и об относительном дифлекс-параметре k -го объекта:

$$\Delta W_k^o = \frac{W_k - W^B(r_k)}{W_k}. \quad (4)$$

Значения электропотребления, соответствующие k -му рангу на верхней и нижней границах переменного доверительного интервала рангового распределения (рис. 5), определяются следующим образом:

$$\begin{cases} W^B(r_k) = W(r_k) + \frac{\Phi^{-1}(p_\delta) [\sigma_k]}{2}, \\ W^H(r_k) = W(r_k) - \frac{\Phi^{-1}(p_\delta) [\sigma_k]}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

где $W(r_k)$ – значение электропотребления на аппроксимационной кривой рангового распределения, соответствующее рангу r_k ;

$\Phi^{-1}(\tau)$ – обратная функция Лапласа, задающая верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала (см. выражение (2));

p_δ – априорно принимаемая (как правило, 95 %-ная) доверительная вероятность;

$[\sigma_k]$ – эмпирический стандарт рангового распределения в параметрическом кластере k -го объекта.

Необходимо отметить, что для сравнения объектов в пределах одного параметрического кластера на фиксированном временном интервале можно использовать относительный дифлекс-параметр. Однако для более тонкой оценки следует осуществлять процедуру ранжи-

рования аномальных объектов по абсолютному дифлекс-параметру с последующей аппроксимацией и получением рангового параметрического распределения. Это позволит определить интегральный дифлекс-параметр техноценоза:

$$\Delta W_{\Sigma} = \int_0^{\infty} \Delta W(r_d) dr_d, \quad (6)$$

где $\Delta W(r_d)$ – ранговое параметрическое распределение «аномальных» объектов техноценоза по абсолютному дифлекс-параметру с рангом r_d .

Аппроксимация распределения обычно осуществляется с помощью стандартной гиперболической формы с параметрами ΔW_1 и β_d :

$$\Delta W = \frac{\Delta W_1}{r_d^{\beta_d}}. \quad (7)$$

Дальнейший анализ техноценоза заключается в получении ключевых динамических дифлекс-функций:

$$\begin{cases} \Delta W_{\Sigma}(t); \\ \Delta W_1(t); \\ \beta_d(t), \end{cases} \quad (8)$$

где t – время функционирования техноценоза.

Реализация процедур прогнозирования применительно к функциям (8) позволяет оценить динамику «аномальных» объектов, а также разработать программу углубленных энергетических обследований на среднесрочную перспективу, реализующую критерий:

$$\sum_{t=1}^m \left(\int_0^{\infty} \Delta W^t(r_d) dr_d \right) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $\Delta W^t(r_d)$ – ранговое параметрическое распределение «аномальных» объектов техноценоза по абсолютному дифлекс-параметру на t -м временном интервале;

m – количество анализируемых временных интервалов.

Прогнозирование

Прогнозирование – процедура оптимального управления ресурсами техноценоза, заключающаяся в определении вероятных значений функциональных параметров в будущем. Применительно к техноценозу прогнозирование может осуществляться G-методами (Gauss-методами, основанными на гауссовой математической статистике), Z-методами (Zipf-методами, основанными на ципфовой математической статистике) и синтетическими GZ-методами, органично сочетающими их достоинства. Однако GZ-прогнозирование предполагает выполнение предварительной процедуры верификации, реализуемой методами GZ-анализа техноценоза (Gauss-Zipf analysis), в основе которого лежит процедура оценки системного параметрического ресурса кластеров объектов. Прогнозирование может выполняться на основе статической модели, корректно отражающей процесс потребления ресурса техноценозом на год вперед. Динамическое стохастическое моделирование, учитывающее вероятные изменения в системе

Ранг	Электропотребление объектов техноценоза по годам, кВтч									
	t-8	t-7	t-6	t-5	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1
1	W_{18}	W_{17}	W_{16}	W_{15}	W_{14}	W_{13}	W_{12}	W_{11}	W_{10}	?
2	W_{28}	W_{27}	W_{26}	W_{25}	W_{24}	W_{23}	W_{22}	W_{21}	W_{20}	?
3	W_{38}	W_{37}	W_{36}	W_{35}	W_{34}	W_{33}	W_{32}	W_{31}	W_{30}	?
4	W_{48}	W_{47}	W_{46}	W_{45}	W_{44}	W_{43}	W_{42}	W_{41}	W_{40}	?
5	W_{58}	W_{57}	W_{56}	W_{55}	W_{54}	W_{53}	W_{52}	W_{51}	W_{50}	?
6	W_{68}	W_{67}	W_{66}	W_{65}	W_{64}	W_{63}	W_{62}	W_{61}	W_{60}	?
7	W_{78}	W_{77}	W_{76}	W_{75}	W_{74}	W_{73}	W_{72}	W_{71}	W_{70}	?
.....
n-1	$W_{(n-1)8}$	$W_{(n-1)7}$	$W_{(n-1)6}$	$W_{(n-1)5}$	$W_{(n-1)4}$	$W_{(n-1)3}$	$W_{(n-1)2}$	$W_{(n-1)1}$	$W_{(n-1)0}$?
n	W_{n8}	W_{n7}	W_{n6}	W_{n5}	W_{n4}	W_{n3}	W_{n2}	W_{n1}	W_{n0}	?

Рис. 6. Структура прогнозной базы данных по электропотреблению: W_{km} – электропотребление k-го объекта в (t – m)-м году

исходных данных, позволяет прогнозировать потребление ресурса техноценозом на среднесрочную перспективу (5 – 7 лет) [4].

Итак, прогнозирование электропотребления объектов техноценоза осуществляется на основе синтетической GZ-методологии, сочетающей достоинства как традиционных (гауссовых), так и техноценологических (цифровых) методов. На рис. 6 приведена структура прогнозной базы данных по электропотреблению.

Предварительно выделяются из состава базы данных техноценоза следующие информационные подсистемы. Фактические известные данные по электропотреблению в текущем году составляют «Вектор верификации». Прогнозируемые данные в будущем году определяются как «Вектор прогнозирования». Все остальные известные данные образуют «Матрицу данных» по электропотреблению (рис. 6).

Процесс прогнозирования электропотребления объектов техноценоза реализуется в два взаимосвязанных этапа. На первом этапе в качестве базы прогнозирования используется матрица данных, применительно к которой реализуются последовательно все имеющиеся в распоряжении методы прогнозирования. Статистическое сравнение полученных прогнозных результатов с соответствующими данными вектора верификации позволяет для каждого из объектов определить наиболее эффективный метод. Затем на втором этапе прогнозирования вектор верификации присоединяется к матрице данных и окончательно прогнозируется электропотребление, причем процедура для каждого объекта осуществляется именно тем методом, который на первом этапе был определен для него как наиболее эффективный. Как уже сказано, данная методология прогнозирования электропотребления техноценоза названа автором GZ-методом. В базе данных прогнозирования могут использоваться самые различные методы. В любом случае в процессе реализации GZ-алгоритма выбирается наиболее эффективный из них (подробнее о методах см. в [4]).

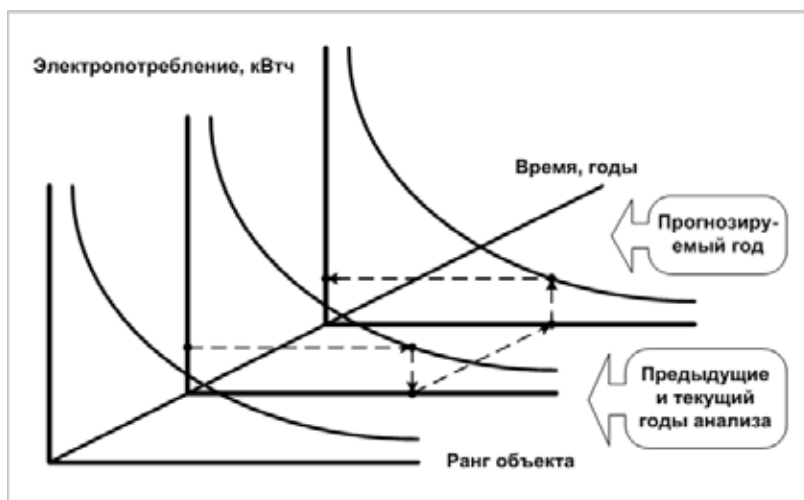


Рис. 7. Прогнозирование электропотребления техноценоза Z-методами

Для прогнозирования электропотребления объектов G-методами в основном используются нелинейные многочлены. В случае необходимости может быть применено линейное или экспоненциальное сглаживание модели, что несколько повышает точность расчетов. В процессе прогнозирования электропотребления техноценоза Z-методами должны учитываться техноценологические свойства, сводящиеся в итоге к понятию устойчивости гиперболических ранговых параметрических распределений (рис. 7). Полная совокупность методов прогнозирования, используемых при моделировании процессов управления электропотреблением, составляет так называемый GZ-модуль прогнозирования, который ранее подробно разобран и опубликован в работах [4-7].

После получения GZ-методами прогнозных значений электропотребления для каждого объекта в отдельности, для техноценоза в целом строится прогнозное ранговое параметрическое распределение. Суммарное электропотребление определяется на основе численной реализации:

$$W_{\Sigma} = \int_0^{\infty} \frac{W_{0п}}{r^{\beta_{п}}} dr, \quad (10)$$

где $W_{0п}$ и $\beta_{п}$ – прогнозные параметры распределения, по эмпирическому выражению:

$$W_{\Sigma} \cong \sum_{k=1}^n W_{пк}, \quad (11)$$

где n – общее количество объектов техноценоза;

$W_{пк}$ – прогнозное электропотребление k -го объекта.

Как показано в работе [4], погрешность прогнозирования электропотребления GZ-методами для отдельных объектов может составить 4 – 10 %. При этом погрешность прогноза для техноценоза в целом, как правило, не превышает 1,5 – 2 % (что можно считать хорошим результатом).

GZ-анализ

В процедуре прогнозирования большую сложность составляет операция выбора G- или Z-методологии. Предлагается выбор осуществлять на основе тонкого GZ-анализа параметрического распределения (рис. 3; 8), а в качестве критерия выбора метода рассматривать соотношение объемов гауссового и системного ресурсов кластеров техноценоза.

Гауссовый ресурс определяется следующим образом (рис. 8):

$$W_G = \left(\int_{r_1}^{r_2} W^g(r) dr \right) - ((r_2 - r_1)W_2), \quad (12)$$

где $W(r)$ – ранговое параметрическое распределение;

$W^g(r)$ – гауссовое распределение параметров кластера, построенное в ранговой дифференциальной форме;

W_2 – значение электропотребления, соответствующее правой ранговой границе кластера.

Соответственно системный ресурс кластера равен (рис. 8):

$$W_Z = \int_{r_1}^{r_2} (W(r) - W^g(r)) dr. \quad (13)$$

Как показано в работе [4], для каждого объекта можно получить отношение системного и гауссового доверительных интервалов, которое называется коэффициентом когерентности и показывает степень согласованности поведения объекта по отношению к техноценозу:

$$K_{GZ} = \lim_{KK \rightarrow KO} \frac{W_Z}{W_G} \cong \frac{\Delta W_Z}{\Delta W_G}, \quad (14)$$

где KK – количество кластеров техноценоза;

KO – количество объектов техноценоза;

ΔW_Z – системный доверительный интервал объекта;

ΔW_G – гауссовый доверительный интервал объекта.

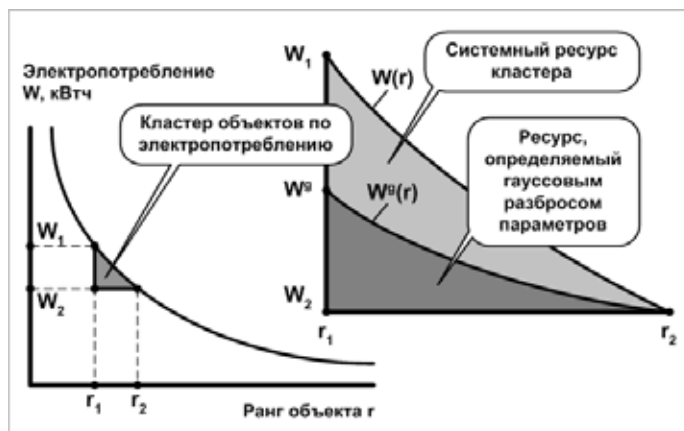


Рис. 8. К вопросу выбора G- или Z-метода прогнозирования по критерию соотношения объемов системного и гауссового ресурсов кластеров

Итак, теоретически коэффициент когерентности может быть определен как предел отношения системного ресурса кластера к его гауссовому ресурсу при условии сужения ширины кластера до нуля (устремления количества кластеров к общему количеству объектов техноценоза). Это проиллюстрировано на рис. 8. Эмпирически же коэффициент когерентности может быть определен как отношение системного доверительного интервала к гауссовому. Если коэффициент когерентности близок к единице (т.е. системный и гауссовый интервалы примерно равны), то можно говорить о согласованном поведении данного объекта и техноценоза (подробнее о коэффициенте когерентности см. в работе [4]).

Дальнейший более глубокий GZ-анализ техноценоза заключается в определении так называемого кумулятивного когерент-фактора (coherent factor), который определяется как отношение суммарных системного и гауссового доверительных интервалов всех объектов техноценоза:

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta W_{Zi} / \sum_{i=1}^n \Delta W_{Gi}, \quad (15)$$

где n – количество объектов техноценоза.

Когерент-фактор техноценоза показывает, в какой степени его системное поведение согласовано с индивидуальным поведением объектов по отдельности (под поведением здесь, безусловно, понимаются свойства параметрических временных рядов электропотребления объектов и техноценоза). Затем с использованием процедур прогнозирования могут быть получены динамические когерент-функции (coherent function):

$$\begin{cases} K_{\Sigma}(t); \\ K_{GZi}(t); \\ i=1 \dots n, \end{cases} \quad (16)$$

где t – время функционирования техноценоза.

Когерент-функции позволяют оценивать в любой момент времени и прогнозировать изменение в будущем динамических свойств как техноценоза в целом, так и его объектов в частности. Когерент-параметры также могут существенно оптимизировать процесс прогнозирования в техноценозе. В частности, как показывают исследования и реализация на практике, коэффициент когерентности является устойчивым индикатором априорного выбора наиболее эффективного метода прогнозирования для рассматриваемого объекта. При сравнительно больших значениях коэффициента лучше работают G-методы, в противном случае – Z-методы, а в качестве критерия выбора может применяться альтернатива [4]:

$$\begin{cases} K_{GZ} \in [K_{GZ}^{mn}; K_{GZ}^1] \Rightarrow Z\text{-метод}; \\ K_{GZ} \in [K_{GZ}^1; K_{GZ}^2] \Rightarrow GZ\text{-метод}; \\ K_{GZ} \in [K_{GZ}^2; K_{GZ}^{mx}] \Rightarrow G\text{-метод}, \end{cases} \quad (17)$$

где K_{GZ}^1 и K_{GZ}^2 – соответственно левое и правое критериальные значения коэффициента когерентности;

K_{GZ}^{mn} и K_{GZ}^{mx} – соответственно минимальное и максимальное значения коэффициента когерентности.

Критериальные значения коэффициента когерентности определяются на основе юстировки базы методов прогнозирования к базе данных по электропотреблению. Здесь находит применение эвристический вариант GZ-анализа, целью которого является определение так называемой GZ-матрицы, которая представляет собой таблицу методов прогнозирования, определенных как наиболее эффективных применительно к объектам на соответствующих временных интервалах (подробнее см. [4]).

Нормирование

Нормирование – процедура оптимального управления ресурсами техноценоза, заключающаяся в определении статистических параметров (среднего и стандарта) кластеров объектов техноценоза, которые выделены на ранговом параметрическом распределении по исследуемому функциональному параметру. Кластеризация позволяет выделить группы объектов, которые на данном временном интервале потребляют ресурс сходным образом (рис. 9). Как показали многочисленные исследования [4-7], процедура нормирования в сочетании с прогнозированием позволяет предъявлять объектам научно обоснованные нормы расходования ресурсов.

В соответствии с [6; 7] кластер-процедуры реализуются на пространстве экспериментальных данных по электропотреблению объектов техноценоза в соответствии с критерием качества разбиения на классы, который на фиксированном множестве f -разбиений $(r_1, W_1), (r_2, W_2), \dots, (r_k, W_k)$ на заданное число классов S_1, S_2, \dots, S_n

$$S_f = (S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (18)$$

выглядит следующим образом:

$$Q(S) = \sum_{f=1}^n \left(\sum_{(r_i, W_i), (r_j, W_j) \in S_f} (d_E^2((r_i, W_i), (r_j, W_j))) \right) \rightarrow \text{extr}, \quad (19)$$

где $d_E((r_i, W_i), (r_j, W_j))$ – взвешенное евклидово расстояние между полученными точками.

Кластер-процедура (18) дополняется проверкой расстояния между классами S_f и S_m , измеренного по принципу «ближнего соседа». При этом циклично реализуется критерий:

$$\rho_{\min}(S_f, S_m) = \min \left\{ d((r_f, W_f), (r_m, W_m)) \right\}_{(r_f, W_f) \in S_f, (r_m, W_m) \in S_m} \rightarrow \max. \quad (20)$$

По результатам кластер-анализа объекты техноценоза разбиваются на группы (классы, кластеры) по «сходному» электропотреблению. После этого возникает возможность определения норм электропотребления внутри каждой из групп. Норма представляет собой среднее и эмпирический стандарт, определяемые на выборке значений электропотребления рассматриваемой группы. Количество групп разбиения целесообразно иметь таким, чтобы в наиболее многочисленные из них входили не более 10 – 12 объектов. Среднее электропотребления для s -й группы объектов определяется следующим образом:

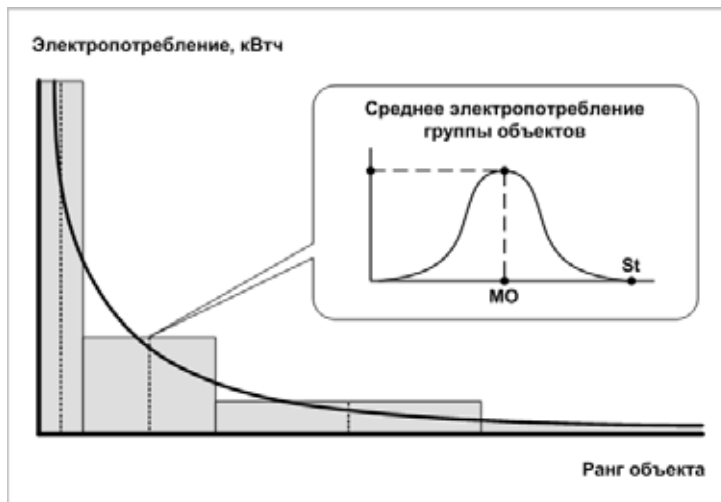


Рис. 9. Нормирование электропотребления в техноценозе

$$\bar{W}_s = \frac{\int_{r_{s-1}}^{r_s} \frac{W_0}{r^\beta} dr}{r_s - r_{s-1}} \cong \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} W_i, \quad (21)$$

где r_{s-1} и r_s – левая и правая ранговые границы нормируемой группы объектов на распределении;
 W_0 и β – параметры рангового распределения;
 n_s – количество объектов в s -й группе;
 W_i – эмпирическое значение электропотребления i -го объекта техноценоза.
 Эмпирический стандарт для этой же группы объектов:

$$\sigma_s \cong \frac{1}{n_s - 1} \sum_{i=1}^{n_s} \sqrt{(W_s - W_i)^2}. \quad (22)$$

ASR-анализ

Классические процедуры кластер-анализа, будучи применены в рамках процедуры нормирования объектов техноценоза, дают неплохие результаты [4; 7], однако обладают существенным недостатком. Они усредняют анализируемый параметр в пределах кластера на основе гауссовой математической статистики и тем самым не учитывают системный ресурс параметрического кластера техноценоза (рис. 8). Устраняется данный недостаток в рамках процедуры ASR-анализа (Adding System Resource analysis), являющейся тонким дополнением к нормированию (рис. 3 и 10).

Реализация процедуры ASR-анализа в данном случае заключается в добавлении к прогнозируемому среднему нормы электропотребления объекта соответствующей его рангу ASR-нормы:

$$\bar{W}_k^{ASR} = \bar{W}_k + (W(r_k) - W^g(r_k)), \quad (23)$$

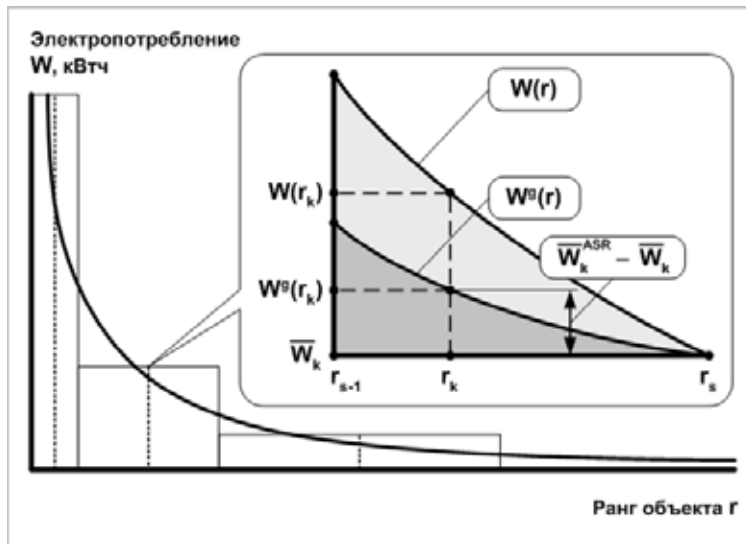


Рис. 10. К вопросу добавления системного ресурса к нормам по электропотреблению в рамках ASR-анализа

где \overline{W}_k^{ASR} – результирующее среднее нормы электропотребления для k -го объекта техноценоза с учетом ASR-нормы;

\overline{W}_k – среднее нормы электропотребления k -го объекта, полученное по результатам процедуры нормирования;

$W(r_k) - W^g(r_k)$ – ASR-норма k -го объекта (обоснование – рис. 8 и выражение (13)).

ASR-нормирование электропотребления техноценоза на эмпирическом материале всей имеющейся базы позволяет закрепить за каждым объектом на каждом временном интервале индивидуальную норму электропотребления. Процедура аппроксимации дает функции зависимости среднего и стандарта нормы k -го объекта во времени:

$$\begin{cases} \overline{W}_k^{ASR}(t); \\ \sigma_k(t), \end{cases} \quad (24)$$

где t – время функционирования техноценоза.

Реализация процедур прогнозирования применительно к функциям (24) позволяет оценить динамику норм электропотребления объектов, а также разработать программу нормирования на среднесрочную перспективу, реализующую критерий:

$$\sum_{t=1}^m \sum_{k=1}^n \overline{W}_{kt}^{ASR} \rightarrow \min, \quad (25)$$

где \overline{W}_{kt}^{ASR} – ASR-среднее нормы электропотребления k -го объекта на t -м временном интервале;

m – количество анализируемых временных интервалов (как правило, это часы, сутки, месяцы, годы);

n – количество объектов техноценоза.

Представляется важным понимать, что объекты в процедуре нормирования электропотребления группируются не по отраслевому или технологическому принципу, а по сходному процессу электропотребления. Следует также отметить, что получаемые таким образом нормы эффективны только для исследуемого техноценоза и не применимы для других, однако для данного техноценоза они надежны и устойчивы. В любом случае их можно непрерывно (помесячно, ежегодно) уточнять, одновременно с изменением базы данных по электропотреблению.

Вывод

Таким образом, на этапе статистического анализа и построения эмпирической модели процесса электропотребления осуществляется глубокая обработка данных по электропотреблению объектов, которая включает интервальное оценивание, прогнозирование и нормирование. Интервальное оценивание выявляет в динамике и наглядно представляет объекты с аномальным электропотреблением. Прогнозирование электропотребления отдельными объектами и техноценозом в целом осуществляется с использованием гауссовых и ципфовых методов. Кластерный анализ позволяет разбить объекты по группам и осуществить нормирование электропотребления объектов в каждой группе с подробным статистическим описанием норм. Более тонкий анализ рангового параметрического распределения позволяет значительно повысить эффективность рангового анализа. Он осуществляется в рамках следующих процедур: дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования) и ASR-анализа (на этапе нормирования).

Список литературы

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: ТГУ, 1993. 552 с.
2. Гнатюк В.И. Моделирование и оптимизация в электроснабжении войск. Вып. 4. Ценологические исследования. М.: Центр системных исследований, 1997. 216 с.
3. Гнатюк В.И. Оптимальное построение техноценозов. Теория и практика. Вып. 9. Ценологические исследования. М.: Центр системных исследований, 1999. 272 с.
4. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Вып. 29. Ценологические исследования. М.: Изд-во ТГУ – Центр системных исследований, 2005. 384 с. <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
5. Гнатюк В.И., Лагуткин О.Е. Ранговый анализ техноценозов. Калининград: БНЦ РАЕН – КВИ ФПС РФ, 2000. 86 с.
6. Гнатюк В.И., Северин А.Е. Ранговый анализ и энергосбережение. Калининград: КВИ ФПС РФ, 2003. 120 с.
7. Гнатюк В.И. и др. М.: Журнал «Электрика», 2003, №№ 2 – 6; 2004, № 7; 2005, № 2; 2006, №№ 1, 7, 12; 2007, №№ 2, 3, 7, 8, 11, 12; 2008, №№ 4, 8. Цикл статей, раскрывающих опыт решения задач оптимального управления электропотреблением.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1978. 832 с.
9. Королюк В.С., Портенко Н.И. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
10. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. М.: Наука, 1986. 328 с.

Optimum Control Power Consumption of Technocenose Methods of the Rank Analysis

Victor I. Gnatyuk

*Kaliningrad state technical university,
30 Bulvar Yuzhniy, Kaliningrad, 236011 Russia*

The base of energysave forms planned realization technical and technological measures, which must be realized within the framework of procedures of optimum control power consumption the infrastructure on system level. The purpose of control is a sequencing power consumption objects of infrastructure, economy directed on payment for consumed electric power of the facilities, got to account organizing action, as well as creation scientifically motivated premiseses for undertaking goal-directed deepened energy audit with the following realization technical and technological measures on energysave. Under infrastructure is in this case understood technocenose (the region as a whole, city, concern, company, region extraction of oil and gas, agrarian infrastructure, group of the troops, network shop and etc.). Main method of the decision of the problems of optimum control power consumption of technocenose is the rank analysis, which allows in process of energysave use the system level operative and system control, which earlier was not used. Herewith procedures are realized in real scale of time consist of the shaping database on power consumption, determination anomalous objects, forecasting and normalization. This enables management of technocenose extracts from energysave additional competitive advantage and spare resource. Already first (organizing) stage to realization of the proposed methods allows to spare before 10 – 15% from volumes of the annual payments for consumed electric power without capital embedding. The following introduction energysave technology else more enlarges spare. In turn, management technocenose gets the toolbox, allowing effectively control in condition of the developing infrastructure.

Keywords: technocenose, optimum control power consumption, rank analysis, special thin procedures of the rank analysis, database, interval valuation, forecasting, normalization, deflex-analysis, GZ-analysis (gauss-zipf analysis), factor of coherence, ASR-analysis (adding system resource analysis).
