

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОЦЕНОЗА

В.И. Гнатюк

Основу энергосбережения составляет планомерная реализация широкого комплекса технических и технологических мер, которым должна предшествовать оптимизация электропотребления (оптимальное управление электропотреблением) инфраструктуры на системном уровне. Ее целью является 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, аграрная инфраструктура, группировка войск, сеть магазинов или заправочных станций и т.п.).

Общая методология исследований в области энергосбережения в соответствии с введенной ранее у Б.И. Кудрина стратификацией может быть условно разделена на три уровня (рис. 1). Первый уровень соответствует исследованиям, нацеленным на конкретные технические и технологические разработки, способствующие снижению объемов электропотребления (светотехника, арматура, электроаппараты, электропривод, электротехнологии и т.д.). В основе методологии здесь лежит имитационное моделирование, которое базируется на аксиоматике гауссовых распределений. На третьем уровне осуществляется стратегическое планирование и прогнозирование в электроэнергетике (оперативное управление, маневрирование максимумами нагрузки, регулирование потоков реактивной мощности и т.д.). Здесь, в дополнение к гауссовой методологии первого уровня, находит применение методология исследования операций, которая в основном базируется на эвристических и алгоритмических процедурах.

Связующим звеном является промежуточный (второй) уровень исследований в области энергосбережения. На нем осуществляется оптимизация электропотребления техноценозов, будучи взятых в целом. В качестве методологической основы на этом уровне применяется ранговый анализ. Именно этот уровень является ключевым при построении нашей методологии управления электропотреблением. Учитывая принципиальные концептуальные и методологические отличия, лежащие в основе исследований на втором уровне, он рассматривается как системный по отношению к уровню исследований, касающихся конкретных технических и технологических решений в области энергосбережения [1-7].

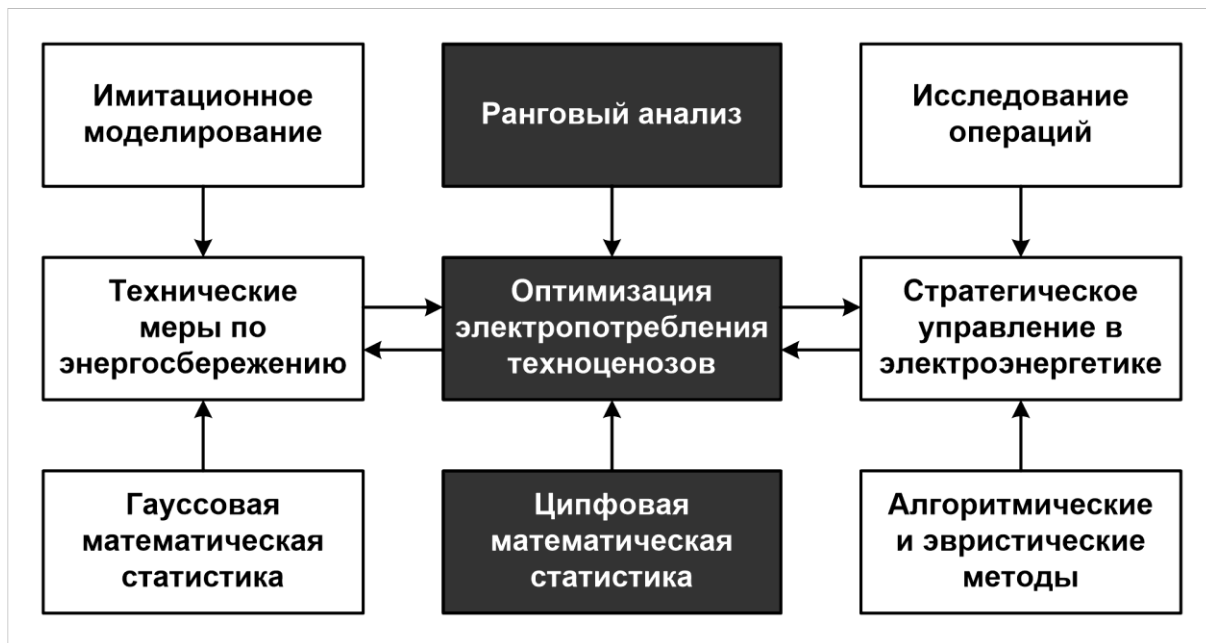


Рис. 1. Методологические уровни исследования в области энергосбережения

Оптимизация электропотребления на системном уровне осуществляется в рамках связанной методики, включающей ряд этапов (рис. 2). На этапе анализа электропотребления техноценоза по специально разработанным формам запроса осуществляется 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.

Информационно-аналитический комплекс «Электроснабжение объектов, входящих в инфраструктуру» 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 практически в реальном масштабе времени. По запросу оператора из базы данных может быть получена любая информация о потребителях электроэнергии с необходимой степенью визуализации, детализации и обобщения.

На этапе статистического анализа и построения эмпирической модели процесса электропотребления осуществляется полномасштабная статистическая обработка данных по электропотреблению, которая включает

взаимосвязанные процедуры рангового и кластерного анализа. Ранговый анализ позволяет упорядочивать информацию, выявлять в динамике и наглядно представлять объекты с аномальным электропотреблением, эффективно осуществлять прогнозирование электропотребления отдельными объектами и техноценозом в целом. Кластерный анализ позволяет разбивать объекты по группам и осуществлять нормирование электропотребления в каждой группе с подробным статистическим описанием норм.

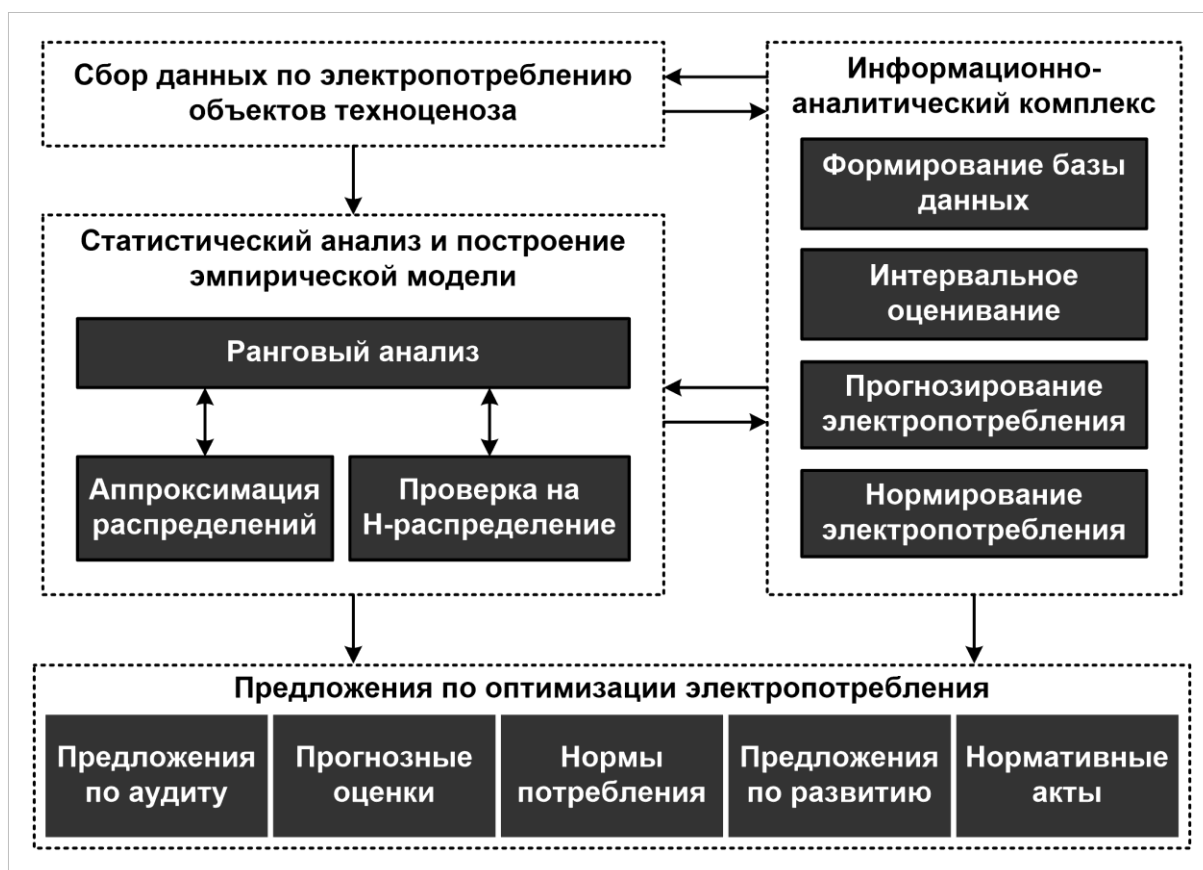


Рис. 2. Общая методика оптимального управления электропотреблением техноценоза

С целью повышения точности расчетов электропотребления 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 лежит техноценологический подход и теория безгранично делимых ранговых распределений. Получение ранговых распределений осуществляется 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 ее строгое соот-

ветствие статистическим критериям N -распределения Б.И. Кудрина. Оценка корректности базы данных осуществляется в рамках первой тонкой процедуры рангового анализа – верификации (рис. 3).

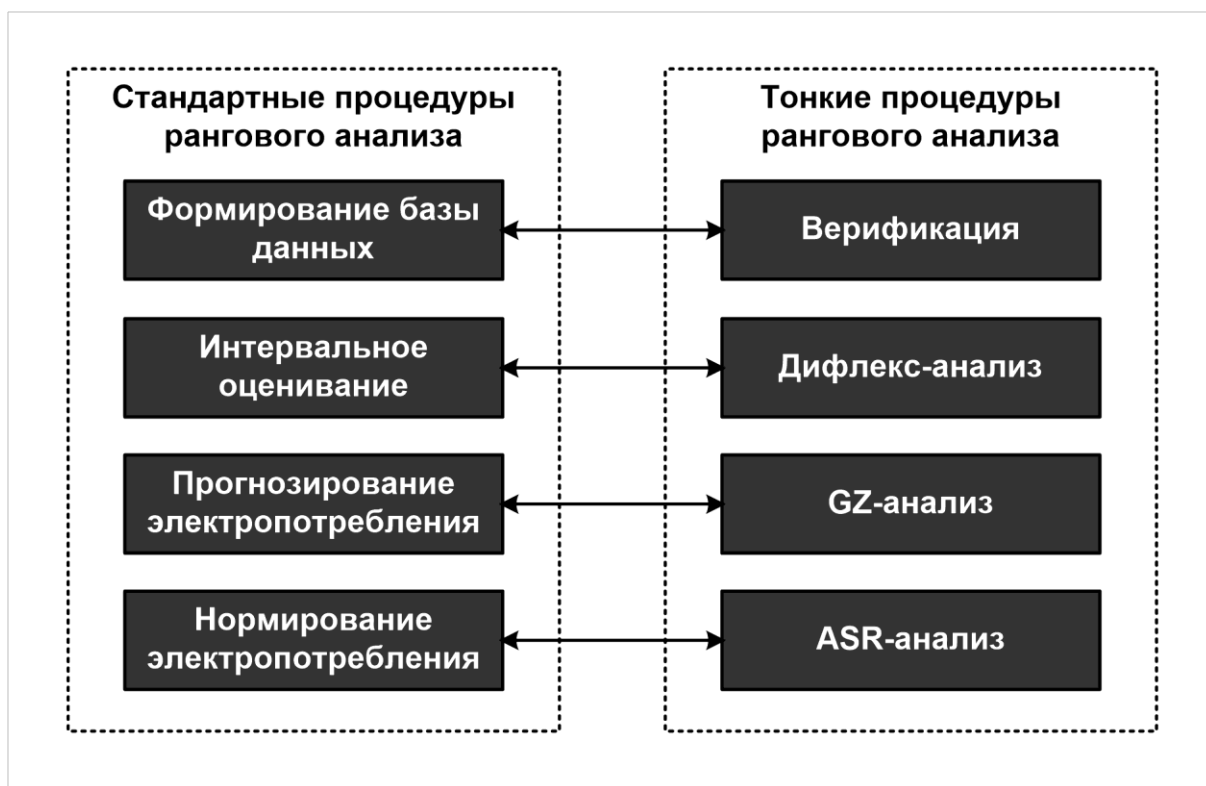


Рис. 3. Тонкие процедуры рангового анализа

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 следующие процедуры: 1) устранение нулевых данных; 2) устранение явно ошибочных данных (выбросов); 3) устранение абсолютно равных данных; 4) восстановление утерянных данных; 5) проверка на N -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 являются следствием грубых ошибок при фиксации параметров обслуживающим персоналом либо сбоев в работе технических средств измерений. Наконец, потеря 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 является обязательной процедурой,

однако она всегда должна применяться в том случае, если есть хотя бы малейшее сомнение в корректности исходных данных.

Проверка соответствия данных критериям Н-распределения заключается в проверке совместного выполнения двух гипотез. Во-первых, совокупность данных не подчиняется нормальному закону и, во-вторых, данные являются значимо взаимосвязанными. В случае если обе гипотезы выполняются, появляется возможность 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 опубликованных ранее наших работах, а также многочисленных работах наших учеников.

Как показано у С.Д. Хайтуна, 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 двухпараметрической гиперболической формы, наилучшим образом описывающей совокупность точек.

Ключевой процедурой рангового анализа является интервальное оценивание рангового параметрического распределения по функциональному параметру (рис. 4). По общему определению интервальное оценивание – процедура оптимального управления ресурсами техноценоза, заключающаяся в определении точек эмпирического рангового параметрического распределения по исследуемому функциональному параметру (в частности у нас – электропотреблению), выходящих за пределы гауссового переменного доверительного интервала, построенного 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 энергетическом обследовании с целью выявления причин подобного аномального функционирования. Очевидно, что целью процедуры интервального оценивания в нашем случае является определение объектов, аномально потребляющих электроэнергию.

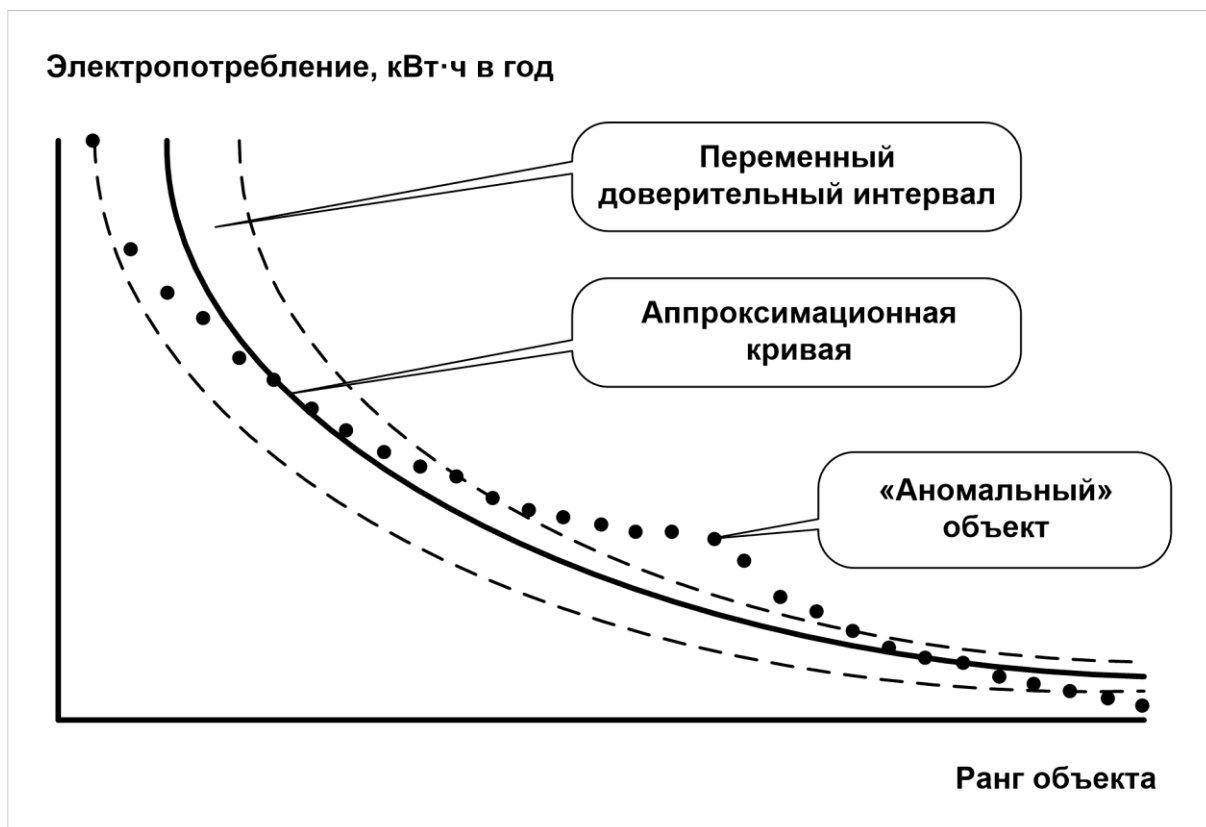


Рис. 4. Определение объектов с аномальным электропотреблением

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:

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

- 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 известная стандартная функция Лапласа:

$$\Phi(\tau) = \frac{1}{2\pi_0} \int_0^{\tau} e^{-x^2/2} dx. \quad (2)$$

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 выше 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 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 оцениванием жизнеспособности объектов по электропотреблению 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). Его целью является разработка оптимального плана 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 общей теории энергосбережения и нашей методологии оптимального управления электропотреблением техноценозов наибольший интерес представляют «аномальные» объекты, электропотребление которых выше верхней границы переменного доверительного интервала. Из рисунка 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 – эмпирическое значение электропотребления 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.

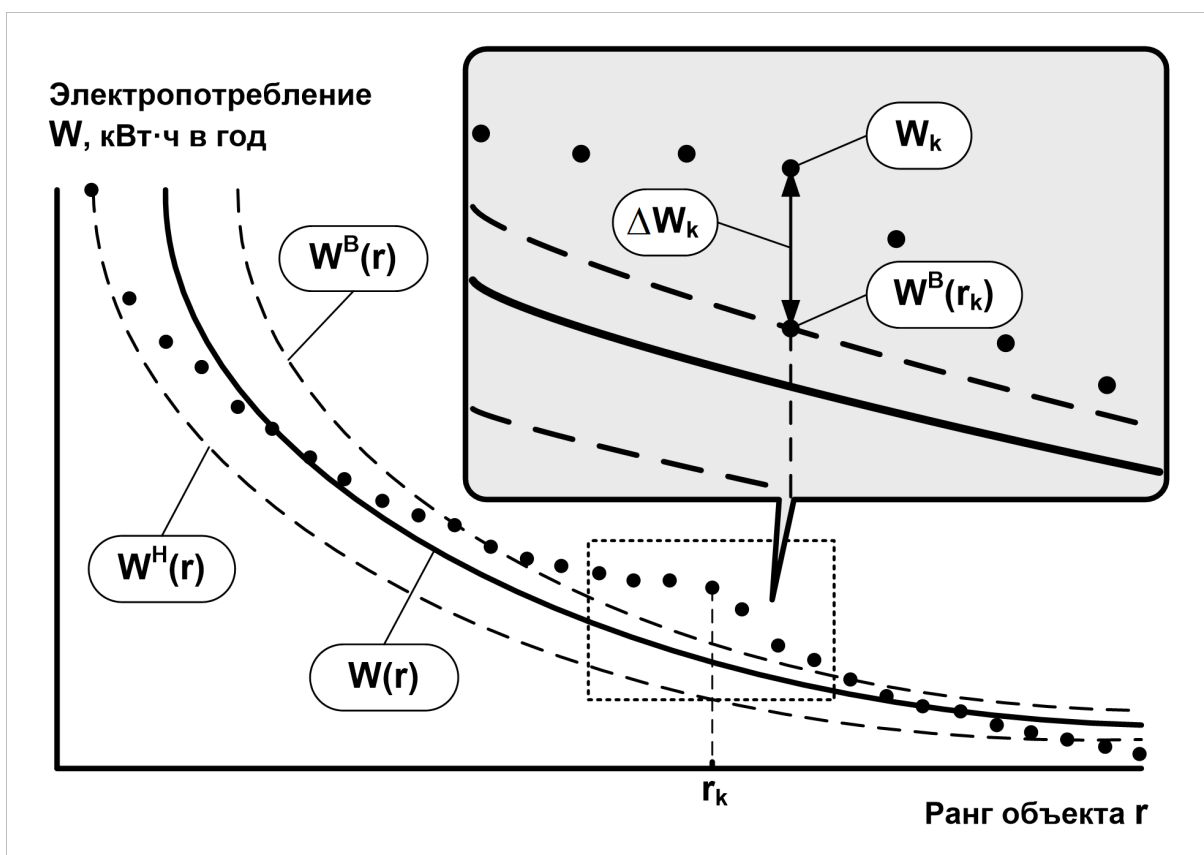


Рис. 5. К вопросу определения отклонения эмпирического значения электропотребления «аномального» объекта от верхней границы переменного доверительного интервала

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

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

Значения электропотребления, соответствующие k-му рангу на верхней и нижней границах переменного доверительного интервала рангового распределения (см. 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 техноценоза, соответствующее рангу r_k ;
 $\Phi^{-1}(\tau)$ – обратная функция Лапласа, задающая верхнюю и нижнюю границы переменного 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.

Следует 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 ранжирования 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 ранговый анализ техноценоза заключается в получении ключевых, так называемых, 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 динамическим 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 -ом временном интервале;
 m – количество анализируемых временных интервалов.

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 исходных данных, позволяет осуществлять прогноз потребления ресурса техноценозом на среднесрочную перспективу (5 – 7 лет).

Итак, прогнозирование электропотребления объектов техноценоза осуществляется на основе синтетической GZ-методологии, сочетающей достоинства как традиционных (гауссовых), так и техноценологических

(цифровых) методов. На рисунке 6 приведена структура прогнозной базы данных объектов техноценоза по электропотреблению.

Ранг	Электропотребление объектов техноценоза, кВт·ч в год										
	...	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)-ом году

Предварительно осуществляется выделение из состава базы данных техноценоза по электропотреблению следующих информационных подсистем. 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» (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 осуществляется окончательный прогноз электропотребления, причем процедура для каждого объекта осуществляется именно тем

методом, который на первом этапе был определен для него как наиболее эффективный. Как уже сказано выше, данная методология прогнозирования электропотребления техноценоза названа автором GZ-методом. В базе данных прогнозирования электропотребления могут использоваться самые различные известные методы. В любом случае в процессе последующей реализации GZ-алгоритма выбирается наиболее эффективный из них.

Для прогнозирования значений электропотребления объектов техноценоза 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 конечном 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 в наших работах.

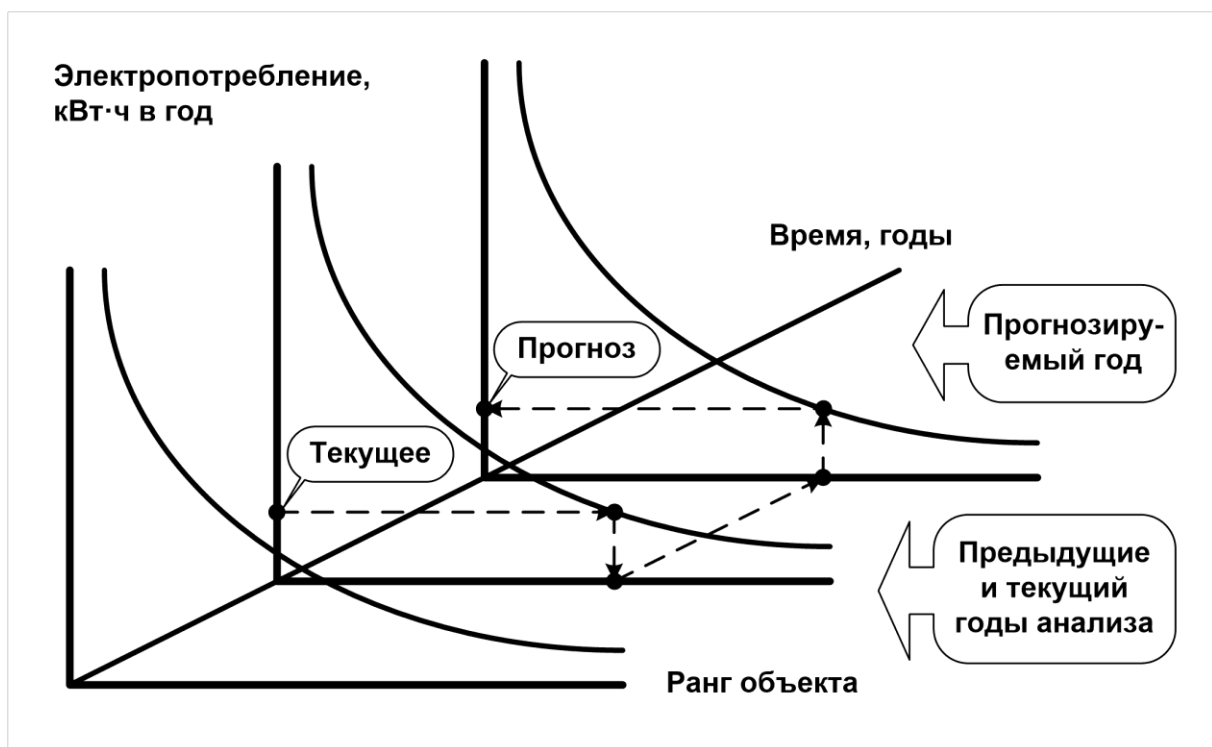


Рис. 7. Прогнозирование электропотребления техноценоза Z-методами

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:

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

где $W_{0\Pi}$ и β_{Π} – прогнозные параметры распределения,

по эмпирическому выражению:

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

где n – общее количество объектов техноценоза;
 $W_{\Pi k}$ – прогнозные электропотребления k -го объекта.

Как показано в ряде наших работ, погрешность прогнозирования электропотребления обсуждаемыми здесь GZ-методами для отдельных объектов может составить 4 – 10 %. При этом погрешность прогноза для техноценоза в целом, как правило, не превышает 1,5 – 2 %.

В процедуре прогнозирования существенную 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 техноценоза по электропотреблению;
 $W^g(r)$ – гауссовое распределение, соответствующее кластерному распределению параметров в ранговой дифференциальной форме;
 W_2 – значение электропотребления, соответствующее правой ранговой границе кластера.

Соответственно системный ресурс кластера равен (рис. 8):

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

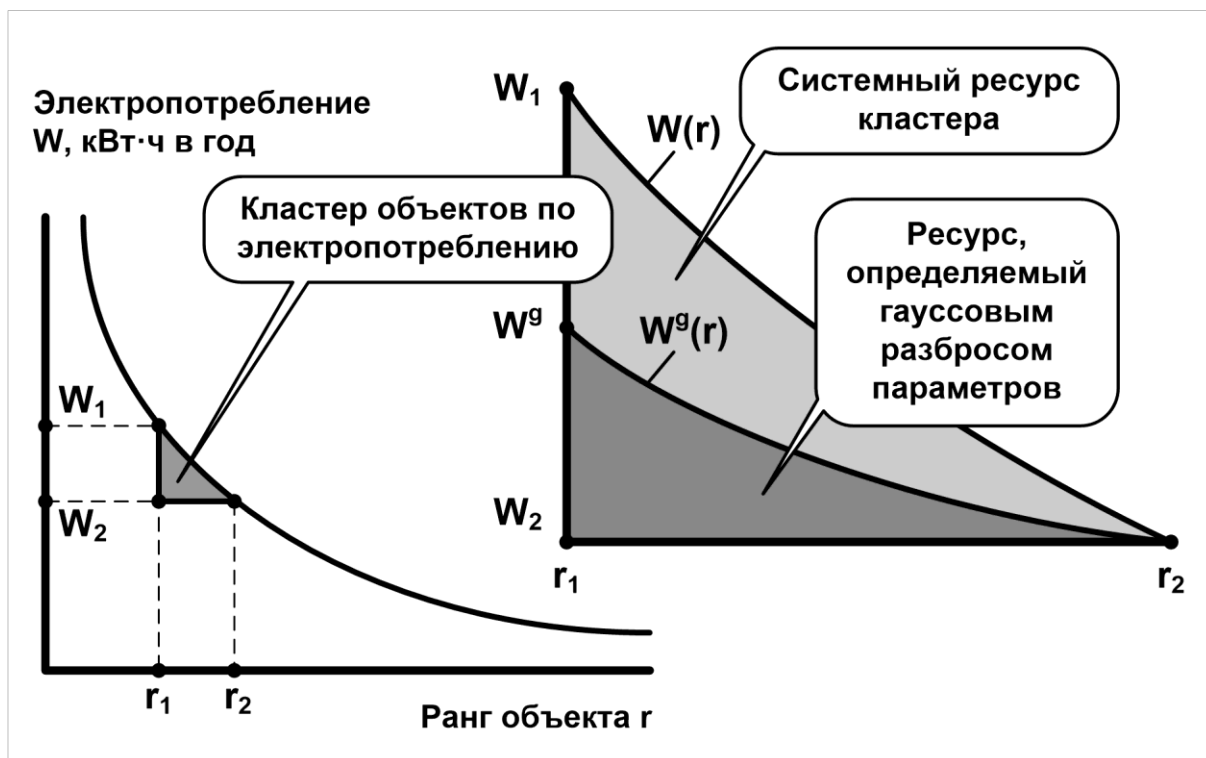


Рис. 8. К вопросу выбора Z- или G-метода прогнозирования по критерию соотношения объемов системного и гауссового ресурсов кластеров

Как показано ранее, для каждого объекта техноценоза 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 КК – количество кластеров техноценоза;

КО – количество объектов техноценоза.

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 рисунке 8. Эмпирически же коэффициент когерентности может быть определен как отношение системного доверительного интервала к гауссовому. Если коэффициент когерентности близок к единице (то есть системный и гауссовый интервалы примерно равны), то можно говорить о согласованном поведении данного объекта и техноценоза.

Дальнейший более глубокий GZ-анализ техноценоза заключается в определении так называемого кумулятивного когерент-фактора (coherent factor), который равен отношению суммарного системного доверительного интервала всех объектов техноценоза к соответствующему суммарному гауссовому доверительному интервалу также всех объектов:

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

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 объектов и техноценоза). Затем 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. Как представляется, когерент-параметры также могут существенно оптимизировать процесс прогнозирования в техноценозе. В частности, как показывают исследования и реализация на практике, коэффициент когерентности является индикатором 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 следующая альтернатива:

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

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 объектов техноценоза по электропотреблению. Здесь находит применение эвристический вариант GZ-анализа, целью которого является определение так называемой GZ-матрицы, представляющей собой таблицу методов прогнозирования, определенных как наиболее эффективных применительно к объектам на соответствующих временных интервалах.

Нормирование – процедура оптимального управления ресурсами техноценоза, заключающаяся в определении статистических параметров (среднего и стандарта) кластеров объектов техноценоза, выделенных 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, процедура нормирования в сочетании с прогнозированием позволяет предъявлять объектам научно обоснованные нормы расходования ресурсов.

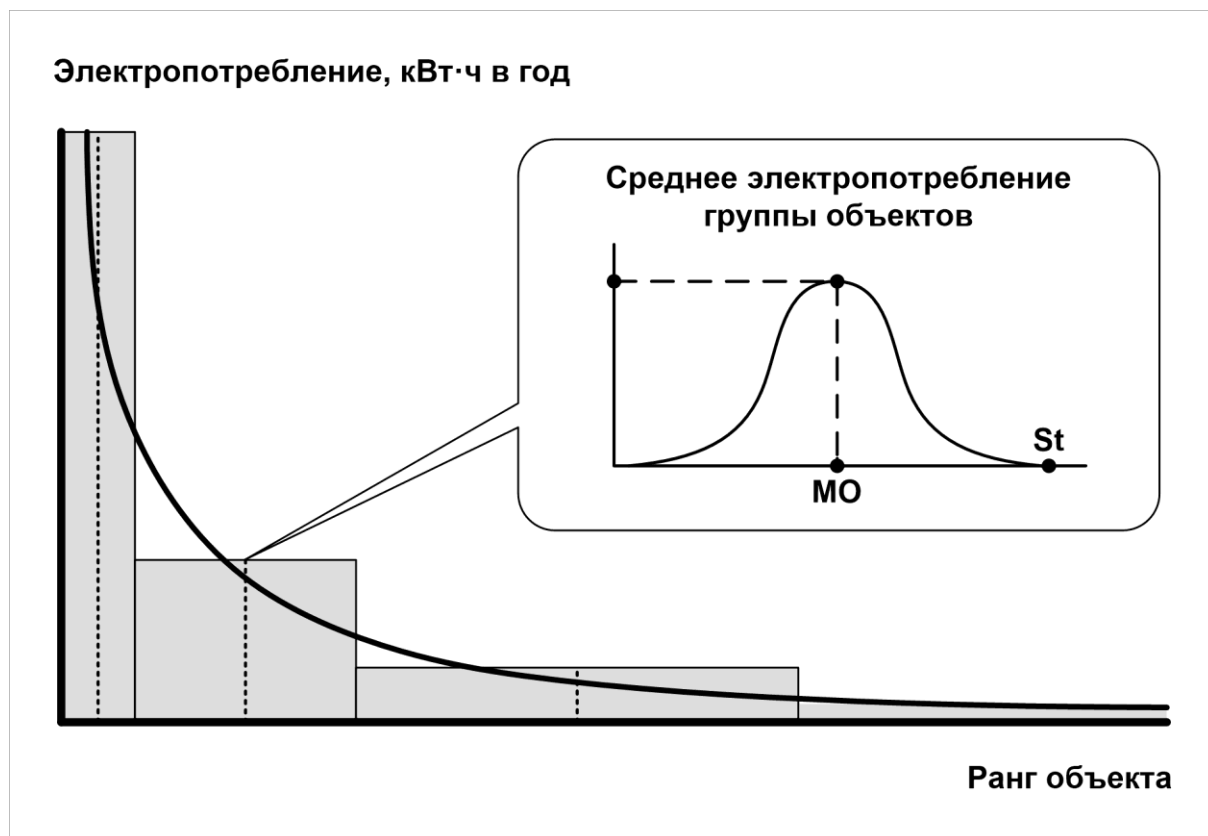


Рис. 9. Нормирование электропотребления в техноценозе

В соответствии с известными методами кластер-процедуры реализуются на пространстве экспериментальных данных по электропотреблению объектов техноценоза в соответствии с выбранным 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:

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

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 в техноценозе целесообразно иметь таким, чтобы в наиболее многочисленные из них входило не более 10 – 12 объектов. Среднее электропотребления для s -ой группы объектов техноценоза определяется следующим образом:

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

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 -ой группе;
 W_i – эмпирическое значение электропотребления i -го объекта техноценоза.

Эмпирический стандарт для этой же группы объектов:

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

Классические процедуры кластер-анализа, будучи применены в рамках процедуры нормирования объектов техноценоза, дают неплохие результаты, 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 (см. рис. 8). Устраняется данный недостаток в рамках процедуры ASR-анализа (Adding System Resource analysis), являющейся тонким дополнением к нормированию (рис. 3 и 10).

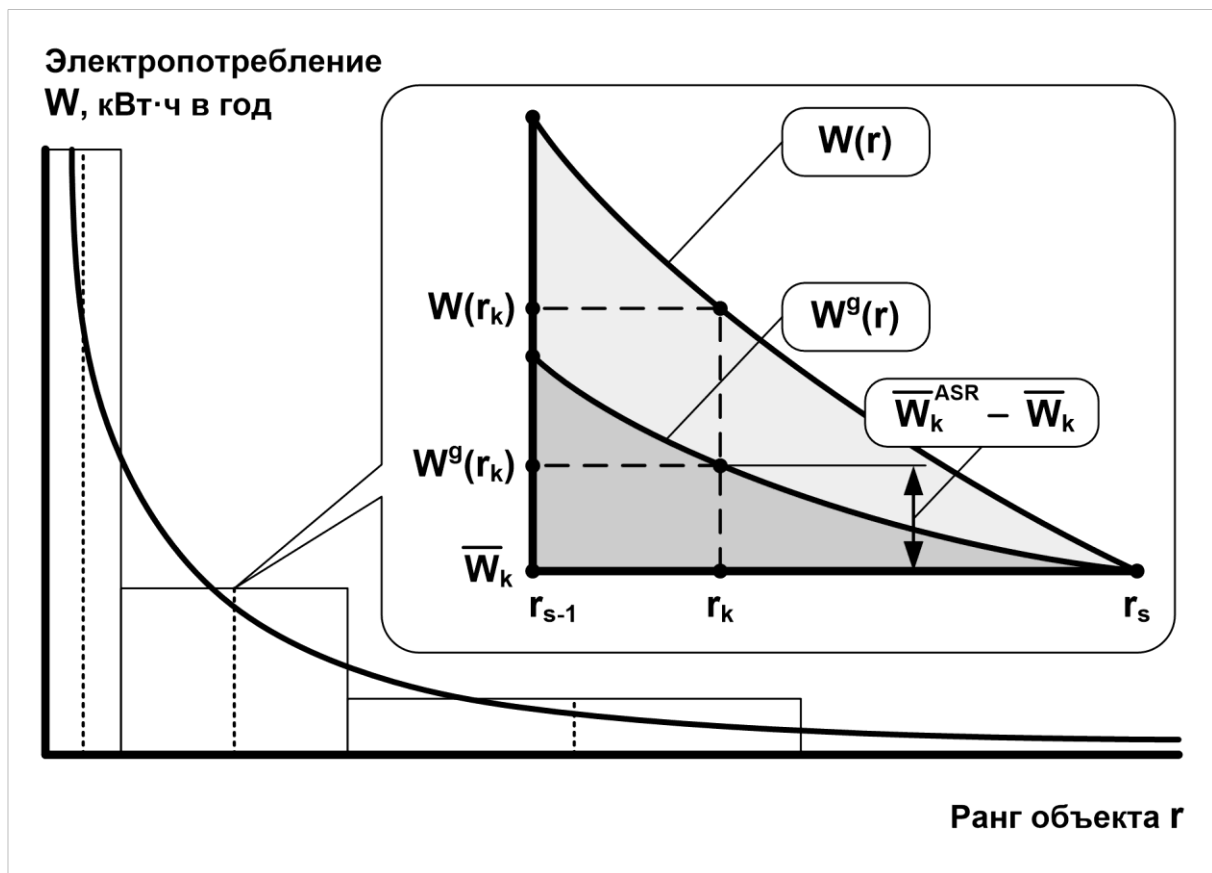


Рис. 10. К вопросу добавления системного ресурса к нормам по электропотреблению в рамках ASR-анализа

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

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

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 (см. (13)).

ASR-нормирование электропотребления объектов 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 представленным выше функциям (24) позволяет оценить динамику норм электропотребления объектов, а также разработать программу нормирования техноценоза 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-ом временном интервале;

m – количество анализируемых временных интервалов;

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, поквартально, ежегодно) уточнять, одновременно с изменением базы данных по электропотреблению.

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 по электропотреблению позволяет существенно 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).

Литература

1. Гнатюк В.И. Техноценологический подход к оценке эффективности вооружения и военной техники // Математическое описание ценозов и закономерности технетики. – Вып. 1. Ценологические исследования. – Абакан: Центр системных исследований, 1996. – С. 229 – 239.
2. Гнатюк В.И. Моделирование и оптимизация в электроснабжении войск: Монография. – Выпуск 4. Ценологические исследования. – М.: Центр системных исследований, 1997. – 216 с.
3. Гнатюк В.И. Оптимальное построение техноценозов. Теория и практика: Монография. – Выпуск 9. Ценологические исследования. – М.: Центр системных исследований, 1999. – 272 с.
4. Гнатюк В.И. Техника, техносфера, энергосбережение: Сайт. – М., 2000. – Адрес в Интернет: <http://www.gnatukvi.ru>. – Рег. от 23.11.2005 № 5409.
5. Гнатюк В.И. Методика номенклатурной оптимизации электротехнических средств: Техноценологический подход: Научное пособие. – Калининград: КВИ ФПС России, 1998. – 32 с.
6. Гнатюк В.И. Методика параметрической оптимизации электротехнических средств: Техноценологический подход: Научное пособие. – Калининград: КВИ ФПС России, 1998. – 80 с.
7. Гнатюк В.И., Лагуткин О.Е. Ранговый анализ техноценозов: Научное пособие. – Калининград: БНЦ РАЕН – КВИ ФПС России, 2000. – 86 с.