КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕХНОЦЕНОЗА

В.И. Гнатюк

В качестве объекта наших исследований рассматривается региональный электроэнергетический комплекс, под которым понимается ограниченная в пространстве и времени обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность источников и потребителей электроэнергии, а также транспортно-сетевого хозяйства и системы материально-технического обеспечения, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения в комплексе с внешней энергосистемой или изолированно цель устойчивого электроснабжения регионального электротехнического комплекса (рис. 1). Последний рассматривается как ограниченная в пространстве и времени обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность потребителей электроэнергии, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения цель оптимального управления электропотреблением [1-11].

Рис. 1. Региональный электроэнергетический комплекс

С методологической точки зрения, рассматривая региональный электроэнергетический комплекс, в котором, как и в любой электрической цепи, реализуется единый процесс производства, передачи и потребления электроэнергии, мы имеем дело с двумя разными предметными областями. Первая рассматривает объект исследования как систему электроснабжения, где в качестве базовой выступает теория электрических цепей. Вторая предметная область изучает объект исследования как взаимосвязанную совокупность потребителей электроэнергии, т.е. техноценоз. Научная проблема, связанная с нашим многолетним практическим воплощением закона оптимального построения техноценозов в области исследования региональных электротехнических комплексов, заключается в разработке теории оптимального управления электропотреблением, в основе которой лежит методология рангового анализа техноценозов [1-11].

Как представляется, ранговый анализ, позволяя решать задачи оптимального построения техноценозов, занимает своего рода промежуточное положение между имитационным моделированием, с помощью которого осуществляется эффективное проектирование отдельных видов техники (пространственно-технологических кластеров), и методологией исследования операций, применяемой в настоящее время для решения проблем геополитического и макроэкономического планирования (рис. 2) [1-11].

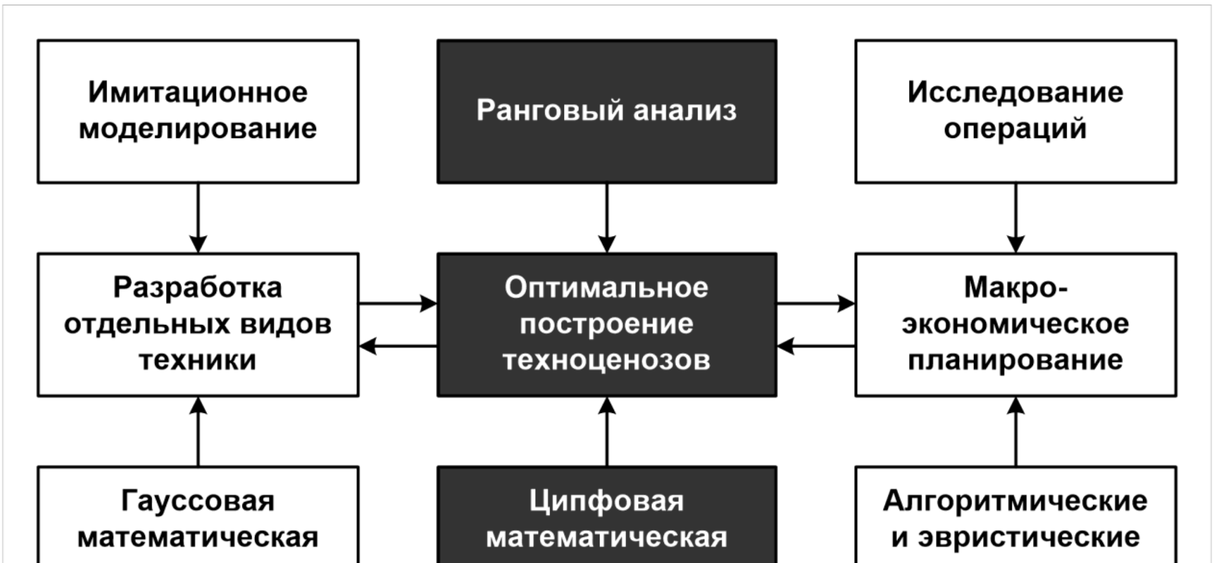

Рис. 2. Место рангового анализа в общей методологии решения научно-технических задач

Представляется важным отметить ряд моментов. Во-первых, отсутствие достаточно глубоко разработанной специальной математической методологии делает аппарат исследования операций весьма ненадежным при решении задач соответствующего макроуровня и приводит, с одной стороны, к многочисленным безрезультатным попыткам применения методов имитационного моделирования в сфере геополитики и макроэкономики, а с другой – порождает глубокое недоверие к данной методологии со стороны подавляющего большинства практиков, которые до сих пор предпочитают полагаться в этих вопросах исключительно на свою интуицию.

Во-вторых, все попытки выдвигать требования, основанные на макропрогнозах и эвристических оценках, непосредственно разработчикам отдельных видов техники, равно как и политика последних, заключающаяся в игнорировании геополитических и макроэкономических процессов, с одинаковым успехом приводят к провалу. Думается, именно техноценологическая методология может разрешить проблему органической связи между крайними уровнями научно-технических задач (рис. 2).

На первом уровне решения научно-технических задач осуществляется разработка видов техники (пространственно-технологических кластеров). Как уже сказано, в качестве основного метода исследования здесь используется имитационное моделирование, базирующееся на классических постулатах гауссовой математической статистики. Основным критерием, которым руководствуется проектировщик, в конечном итоге является достижение максимального положительного эффекта при минимальных затратах. Формально данный критерий не вызывает сомнений, т.к. полностью соответствует философскому толкованию полезности технического изделия, восходящему к аристотелевскому «минимаксу». Проблема заключается лишь в том, что здесь закладывается в понятие «положительный эффект» и что – в «затраты». Большинство разработчиков техники трактует эти понятия в узком смысле как некие интегральные параметры, рассчитываемые без глубокого учета того, что произойдет после попытки внедрения спроектированного технического изделия в инфраструктуру техноценоза. В результате может оказаться, что новое техническое изделие вполне хорошо, будучи рассмотрено и испытано как совершенно независимый образец техники. Однако попытки его внедрения в конкретную инфраструктуру могут закончиться полным провалом из-за невозможности адекватного обеспечения жизненного цикла системами управления, восстановления, снабжения, подготовки кадров, утилизации и т.д.

На высшем уровне геополитического и макроэкономического планирования и прогнозирования решения принимаются на основе эвристических и алгоритмических процедур, базирующихся в основном на методологи исследования операций и квалиметрии (рис. 2). Очевидно, что этот уровень является системным по отношению к первому, на котором проектируются отдельные виды технических изделий. Однако «расстояние» между ними настолько велико, что трудно говорить о какой-либо корректной методологии, позволяющей не на словах, а на деле учитывать геополитические интересы при проектировании или модернизации отдельного вида техники. Или, наоборот, в процессе принятия геополитических решений в какой-либо отрасли экономики корректно учитывать параметры техники, представляющей данную отрасль на рынке. Ясно, что подобной методологии собственно на первом и третьем уровнях нет, если конечно мы говорим о научной методологии в полном смысле этого слова.

Таким образом, для решения сформулированных выше задач в области исследования технических систем имеется так называемый средний связующий уровень (рис. 2). Здесь применяется специфическая методология, основанная на философском техноценологическом подходе, алгоритмических процедурах рангового анализа и негауссовой (ципфовой) математической статистике устойчивых гиперболических безгранично делимых распределений. Задачей, которая решается на данном уровне, является оптимальное построение техноценозов. В основе же методологии, применяемой при решении данной задачи, лежит ранговый анализ. Рассмотрим его ключевые понятия, математические основы и содержание.

В первую очередь в методологии рангового анализа надо остановиться на понятии распределения. В самом общем случае распределение – это расположение элементов подмножества внутри множества. В математике рассматриваются статистические и вероятностные распределения. Как правило, исследователь начинает работу с построения статистического распределения, которое возникает при эмпирическом описании выборки конечного объема из генеральной совокупности. Следовательно, оно дискретно на множестве значений случайной величины. Как идеализация статистического распределения в ситуации, когда объем выборки из генеральной совокупности стремится к бесконечности, возникает вероятностное распределение, которое в общем случае является непрерывным на множестве значений соответствующей случайной величины.

Вторым ключевым моментом является понятие случайной величины, которое базируется на общем представлении о случайности. В своих книгах Ю.В. Чайковский различает семь причин случайности: 1) непонятая закономерность; 2) скрещение несогласованных процессов; 3) уникальность; 4) неустойчивость движения; 5) относительность знания; 6) имманентная случайность; 7) произвольный выбор. Нам представляется, что при исследовании объектов техноценологического типа мы, в той или иной степени, имеем дело с причинами пятого и седьмого типов [11].

Во-первых, насыщение техноценозов изделиями-особями происходит в условиях одновременного воздействия огромного количества слабосогласованных внешних и внутренних факторов, что делает случайной его номенклатуру или видовую структуру. Также доказано, что видообразование в техноценозе фрактально, а его границы размыты, конвенционны. Кроме того, техноценоз постоянно изменяется во времени, причем это изменение векторизовано и необратимо (однонаправленно). Данные феномены ранее широко обсуждались в литературе (обзор – см. в [1]). Следовательно, можно говорить, что в данный фиксированный момент времени номенклатура техноценоза является случайной. И если описать номенклатуру частотным распределением, то форма последнего будет случайной (его параметры будут случайными величинами). Здесь мы имеем дело в полном смысле этого слова с проявлением трансцендентности техноценозов, делающей наши знания относительными, что является фундаментальной причиной случайности (в данном случае – пятого типа).

С другой стороны, совокупность параметров, описывающих особи техноценоза, составляет двумерное пространство. Оба измерения данного пространства бесконечны, однако, одно из них счетно (перечисляющее особи техноценоза), а второе – континуально (описывающее параметры). Это является следствием другого известного свойства техноценозов, а именно того, что число особей в них бесконечно (точнее, математически счетно). Кроме того, общее параметрическое пространство делится на два равномощных подпространства: видообразующих и функциональных параметров. В любом случае, если осуществлять произвольный выбор особей техноценоза, то параметры выбранных технических изделий составят статистическую выборку случайных величин. Если учесть, что техноценоз трансцендентен, то выбор особей при этом может осуществляться как угодно. Очевидно, что любой выбор из трансцендентной бесконечности будет произвольным и, по сути, случайным (причина седьмого типа). Если полученную выборку обрабатывать методами математической статистики, то можно получить параметрическое распределение [11].

Таким образом, случайным в широком смысле является сочетание видов, составляющих техноценоз, если мы его рассматриваем среди большого количества других техноценозов. Судить о статистическом (и далее – вероятностном) распределении данных сочетаний можно лишь исследовав поведение техноценозов в более общем таксономическом образовании – метаценозе (доступной для исследования в данный момент времени совокупности техноценозов). В узком смысле случайной является форма видового распределения, описывающего номенклатуру техноценоза, что делает случайной величиной значение соответствующих формальных параметров. С другой стороны, если рассматривать совокупность одноименных параметров технических изделий (особей) техноценоза как выборку из параметрического пространства, то значение фиксированного параметра конкретного изделия может рассматриваться как случайная величина, а саму выборку можно описать как статистическое распределение.

Ввиду важности, следует еще раз подчеркнуть принципиальную разницу между видовыми и ранговыми распределениями техноценозов. Видовые распределения случайны в том смысле, что случайны макроскопические параметры их формы. Ранговые же распределения – это распределения случайных величин (параметров, характеризующих особи или объекты). Именно в этом смысле мы и применяем к техноценозам понятие статистического распределения. Последующее особое теоретическое обобщение на континууме техноценоза (будет показано ниже с помощью аппарата аппроксимации на основе топологических представлений) позволяет получать параметрическое распределение, имеющее смысл вероятностного.

Третьим ключевым моментом в методологии рангового анализа являются понятия негауссовости и ципфовости описывающих техноценозы гиперболических распределений. Как всегда, начнем с определений.

Вероятностное распределение мы называем гауссовым, если для него выполняется центральная предельная теорема: при широких предположениях относительно законов распределения независимых случайных величин с ростом числа слагаемых закон распределения суммы этих величин неограниченно приближается к нормальному. Статистическое распределение называется гауссовым, если зависимость его среднего и дисперсии от объема выборки несущественна, т.е. в условиях данной конкретной исследовательской задачи выполняется закон больших чисел: при достаточно большом числе независимых испытаний среднее арифметическое наблюденных значений случайной величины сходится по вероятности к ее математическому ожиданию. Очевидно, что, в общем случае, любое вероятностное или статистическое распределение, для которого не выполняется хотя бы одно из соответствующих условий, является негауссовым.

Рассмотрим положительную переменную w, определяющую континуум возможных значений случайной величины W. Ципфовым называется распределение случайной величины W, имеющее при сравнительно больших значениях переменной w вид распределения Ципфа:

$$f(w) = \frac{C}{w^{1+\alpha}};\ w \ge W_0 > 0;\ 0 < \alpha < \infty, \tag{1}$$

где $f(w)$ – плотность вероятности распределения W;
W_0 – минимальное значение переменной w;
C, α – параметры распределения.

По С.Д. Хайтуну, распределение Ципфа ципфово, ципфовое же распределение в общем случае не является распределением Ципфа. Вероятностное ципфовое распределение гауссово при значениях показателя распределения $\alpha \ge 2$ и негауссово при $\alpha < 2$. Статистическое ципфовое распределение с $\alpha > 2$ также может быть и негауссовым, если зависимость его среднего и дисперсии от объема выборки существенна.

Видовые и ранговые распределения техноценозов относятся к классу так называемых устойчивых безгранично делимых распределений. В общем случае распределение вероятностей случайной величины W в вероятностном пространстве называется безгранично делимым, если для всякого k можно указать такое распределение W_k, что распределение W представимо в виде k-кратной свертки распределения W_k самого с собой. Кроме того, безгранично делимые распределения могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми. Говорить, в приложении к ранговому анализу техноценозов, о неустойчивых распределениях смысла нет, т.к. последние не предполагают вообще какой-либо фиксированной интегральной или дифференциальной аппроксимационной формы.

К настоящему времени на обширном статистическом материале в различных областях показана одновременно устойчивость и негауссовость ранговых параметрических распределений техноценозов [1-11]. Следовательно, для их статистического описания особое значение имеет распределение Ципфа с $\alpha < 2$, которое удовлетворяет известной предельной теореме Гнеденко – Деблина. В ней доказывается, что для сходимости распределений нормированных сумм одинаково распределенных независимых случайных величин к устойчивым распределениям, отличным от нормального, необходимо и достаточно, чтобы при $w \to \infty$ имело место (тильдой обозначена асимптотическая, сильная эквивалентность функций):

$$\begin{cases} f(-w) \sim C_1 \dfrac{h_1(w)}{|w|^{\alpha}},\ C_1 \ge 0;\ 0 < \alpha < 2; \\ 1 - f(w) \sim C_2 \dfrac{h_2(w)}{w^{\alpha}};\ C_2 \ge 0;\ C_1 + C_2 > 0, \end{cases} \tag{2}$$

где C_1, C_2, α – параметры распределения Ципфа;

$h_i(w)$ – функции, медленно меняющиеся в смысле Карамата, т.е. такие, что для всех $t > 0$ имеет место предельное равенство: $\lim\limits_{w\to\infty} \dfrac{h_i(t \cdot w)}{h_i(w)} = 1.$

Распределение Ципфа, как и любое другое, имеет частотную и ранговую формы. В частотной форме, как правило, представляются гауссовые распределения, в ранговой – негауссовые ранговые видовые и ранговые параметрические (по видообразующим или функциональным параметрам). Частотная дифференциальная форма вероятностного распределения Ципфа определяется приведенным выше выражением (1). Его частотная интегральная форма, как правило, выражаемая через функцию распределения, для выборки определенного объема выглядит следующим образом:

$$F(w) = \frac{C}{\alpha \cdot n}\left(\frac{1}{W_0^{\alpha}} - \frac{1}{w^{\alpha}}\right) \cong 1 - \frac{W_0^{\alpha}}{w^{\alpha}}, \qquad (3)$$

где $F(w)$ – функция распределения случайной величины W;
n – объем выборки рассматриваемого распределения;
W_0 – минимальное значение переменной w;
C, α – параметры распределения.

Ранговая дифференциальная форма вероятностного распределения W ставит в однозначное функциональное соответствие значению самой случайной величины значение ранговой топологической меры:

$$W(x) = \frac{A}{(x + B)^{\beta}}, \qquad (4)$$

где A, B, β – формальные параметры распределения;
x – ранговая топологическая мера.

Ранговая топологическая мера – количественная форма, отражающая качественное свойство случайной величины обладать в своей реализации большим или меньшим значением. Ранговая топологическая мера численно определяется как помноженная на количество реализаций случайной величины вероятность того, что будет превышено значение величины, соотносимое с данной ранговой топологической мерой (при условии, что количество реализаций стремится к бесконечности). Она дает континуальное обобщение понятия ранга как целочисленной меры близости реализаций случайной величины в упорядоченной последовательности, построенной по убыванию данной величины (подробнее – см. в [1,11]). Итак, для любого расчетного значения ранговой топологической меры можем записать:

$$x_p = \lim_{n \to \infty}\left\{\left(P(W > W(x_p))\right) \cdot n\right\}, \qquad (5)$$

где x_p – расчетное значение ранговой топологической меры;
$W(x_p)$ – значение величины W, соотносимое на распределении с расчетным значением ранговой топологической меры x_p, определяемое по выражению (4);
n – количество реализаций случайной величины W.

Ранговая интегральная форма вероятностного распределения определяет непрерывную функцию на области определения ранговой топологической меры x, которая получается преобразованием частотной интегральной формы (3) с учетом ранговой дифференциальной формы (4):

$$\Phi(x)=\begin{cases} A\ln\dfrac{x+B}{1+B},\ \beta=1; \\ \dfrac{A}{\beta-1}\left(\dfrac{1}{(1+B)^{\beta-1}}-\dfrac{1}{(x+B)^{\beta-1}}\right),\ \beta\neq 1, \end{cases} \tag{6}$$

где $\Phi(x)$ – функция, получаемая путем интегрирования функции ранговой дифференциальной формы W(x) в пределах от минимального значения x до текущего;

x – ранговая топологическая мера.

Если исходить из того, что параметры n, W_0 и W_m являются независимыми, четыре параметра распределения Ципфа (для всех форм) можно поставить в соответствие α следующим образом (по С.Д. Хайтуну):

$$\begin{cases} \beta=\dfrac{1}{\alpha};\ C=\dfrac{\alpha(n-1)}{1/W_0^{\alpha}-1/W_m^{\alpha}}; \\ A=\left(\dfrac{n-1}{1/W_0^{\alpha}-1/W_m^{\alpha}}\right)^{1/\alpha}; \\ B=\dfrac{n-1}{(J/W_0)^{\alpha}-1}-1, \end{cases} \tag{7}$$

где W_0 и W_m – минимальное и максимальное значения W.

Система (7) позволяет учесть эффект рангового искажения, который подробно описан у С.Д. Хайтуна. При этом один из пяти параметров распределения Ципфа (в случае применения (7) – это, как правило, α) должен быть определен априорно по имеющимся эмпирическим данным.

Для оценки степени негауссовости распределения случайной величины W могут быть использованы полученные С.Д. Хайтуном зависимости первых двух центральных моментов распределения от значения W_m :

$$\frac{M}{W_0} = \frac{\int\limits_0^{W_m/W_0} y^{-\alpha} dy}{\int\limits_0^{W_m/W_0} y^{-(1+\alpha)} dy};$$

$$\frac{D}{W_0^2} = \frac{\int\limits_0^{W_m/W_0} \left(y - \left(M/W_0\right)\right)^2 y^{-(1+\alpha)} dy}{\int\limits_0^{W_m/W_0} y^{-(1+\alpha)} dy}, \tag{8}$$

где M – первый центральный момент (математическое ожидание) распределения случайной величины W;

D – второй центральный момент (дисперсия) распределения случайной величины W (корень из дисперсии – среднее квадратичное отклонение);

y – формальная переменная интегрирования.

С помощью (8) можно оценить степень зависимости моментов распределения от объема выборки при конкретных значениях параметров ранговой дифференциальной формы вероятностного распределения W. При этом, как правило, используются первый и второй центральные моменты, (математическое ожидание и дисперсия). Считается, что распределение случайной величины W можно считать негауссовым, если, при изменении (W_m / W_0) в диапазоне от 10^2 до 10^4, отмечается устойчивый квазилинейный рост (M / W_0) минимум на 5 – 10 %, а (D / W_0^2) – на 25 – 30 %.

Сделаем ряд важных замечаний. Прежде всего, отметим, что любое статистическое распределение случайной величины можно описать (в более строгом смысле – аппроксимировать) вероятностным распределением. Для этого можно использовать как частотную форму распределения, так и ранговую. Однако для описания гауссовых распределений традиционно принято использовать частотную форму (плотность вероятности и функцию распределения), т.к. они позволяют получить и в дальнейшем плодотворно использовать при моделировании устойчивые значения центральных моментов распределения. Для негауссовых статистических выборок случайных величин также можно построить распределения в частотной форме и рассчитать соответствующие моменты. Однако, ввиду существенной зависимости последних от объема выборки, использовать их при моделировании представляется невозможным. Следовательно, негауссовые выборки следует аппроксимировать вероятностными распределениями в ранговой форме, параметры которых, в отличие от моментов, в пределах одной генеральной совокупности ведут себя достаточно устойчиво.

Особо подчеркнем четыре весьма важных аспекта. Во-первых, в области негауссовых распределений переход от статистического распределения к вероятностному осуществляется посредством процедуры аппроксимации собственно статистической выборки (о чем будет более подробно сказано ниже). Во-вторых, для подобной аппроксимации целесообразно использовать распределение Ципфа в ранговой дифференциальной форме. В-третьих, параметры полученной аппроксимационной формы будут устойчивы в рамках исследуемой генеральной совокупности (очевидно, что переход к другой генеральной совокупности потребует другой аппроксимации). Наконец, в-четвертых, любым подобным операциям над выборками должна предшествовать процедура проверки на негауссовость.

Вернемся к ранговому анализу техноценозов. Известно, что основным инструментом рангового анализа [1-11] является ранговое параметрическое распределение. Вообще под ранговым распределением традиционно понимают полученное в результате процедуры ранжирования видов или особей техноценоза по какому-либо параметру статистическое распределение Ципфа в ранговой дифференциальной форме, по сути, являющееся невозрастающей последовательностью значений самих параметров, поставленных в соответствие рангу. Различают ранговые распределения, в которых ранжируются виды по количеству особей, которым они представлены в техноценозе (ранговые видовые), или объекты по значению параметра (ранговые параметрические). Рассмотрим более подробно ранговые параметрические распределения техноценоза по функциональным параметрам. И здесь лучше вновь обратиться к объекту наших исследований (рис. 1), в качестве которого выступает региональный электротехнический комплекс как техноценоз, а в качестве параметра – дифференциальное электропотребление (далее – просто электропотребление) [1-11].

Начнем с понятия целочисленного ранга, под которым понимается номер по порядку при расположении объектов техноценоза в порядке снижения их электропотребления. При параметрическом описании техноценоза изначально мы имеем дело с множеством эмпирических значений электропотребления объектов в фиксированный момент времени:

$$\left\{W_k\right\}_{k=1}^{n}, \qquad (9)$$

где W_k – значение электропотребления k-го объекта техноценоза;
k – индекс, применяемый при описании объектов;
n – общее количество объектов техноценоза.

После процедуры ранжирования появляется возможность установить взаимно-однозначное соответствие между множествами:

$$\left\{W_k\right\}_{k=1}^{n} \xrightarrow[f:W\to R]{} \left\{R_k\right\}_{k=1}^{n}, \tag{10}$$

где $\left\{R_k\right\}_{k=1}^{n}$ – множество возможных рангов объектов техноценоза в фиксированный момент времени;

$f: W \to R$ – числовая функция, устанавливающая соответствие между элементами множеств.

Здесь имеет смысл отвлечься и рассмотреть подробнее понятие объекта техноценоза, под которым в узком смысле понимается пространственно-технологический кластер, подсистема техноценоза, взаимосвязанная, отграниченная и обладающая целостностью с точки зрения общности управления, технологии, территории, потребления ресурсов (в данном случае – электропотребления). Как правило, в качестве объектов в региональном электротехническом комплексе (как техноценозе) определяются подразделения, достаточно четко фиксируемые в оргштатной структуре, имеющие свою систему управления (и всестороннего обеспечения), а также точки фиксации электропотребления. По сути, объекты техноценоза в данном случае выступают в качестве потребителей электроэнергии, под которыми формально понимаются лица (физические или юридические), приобретающие электрическую энергию для собственных бытовых и/или производственных нужд. Однако в составе каждого потребителя также имеются более мелкие подразделения (как правило, не являющиеся юридическими лицами), зачастую со своей усеченной системой управления и индивидуальным учетом электропотребления. Данные подразделения более мелкого уровня, с точки зрения электропотребления, состоят из зданий, сооружений и технических систем, в составе которых функционирует огромное количество приемников электроэнергии – функционально законченных систем, предназначенных для преобразования электроэнергии в другие виды энергии. Важно учитывать, что приемники электроэнергии уже не имеют своей индивидуальной системы управления и всестороннего обеспечения, а также у них, как правило, отсутствует индивидуальный учет электропотребления. И даже если учет, все же, имеется (в последнее время появляется достаточно много, так называемых, «умных» приемников электроэнергии), то, ввиду отсутствия системы управления, полученные данные ассоциируются с электропотреблением на более высоком оргштатном уровне (на уровне потребителей). В свою очередь, приемники электроэнергии делятся на подсистемы (технические системы, цепи, узлы, агрегаты, детали и т.д.), часть из которых специально предназначена для преобразования электроэнергии в другие виды энергии, а часть – выполняет иные функции (тем не менее, зачастую также преобразуя электроэнергию). В подобном разбиении целого на части можно бесконечно двигаться дальше вплоть до фундаментальных источников процесса электропотребления – элементарных частиц и полей, из которых состоят все объекты окружающего материального мира (в т.ч. и подсистемы приемников электроэнергии).

Таким образом, с точки зрения электропотребления в техноценозе мы имеем дело с фракталоподобной дисконтинуальной средой. В настоящее время во многих областях физики, химии, нейробиологии, информатики, социологии, экономики и др. показано, что подобные среды при их параметрическом описании генерируют негауссовые выборки. В процессе мониторинга регионального электротехнического комплекса (рис. 3) мы чаще всего получаем устойчивые негауссовые безгранично делимые распределения по электропотреблению конечной размерности с бесконечной дисперсией, которые являются композицией бесконечного числа независимых случайных гауссовых процессов и пуассоновских потоков [1-11].

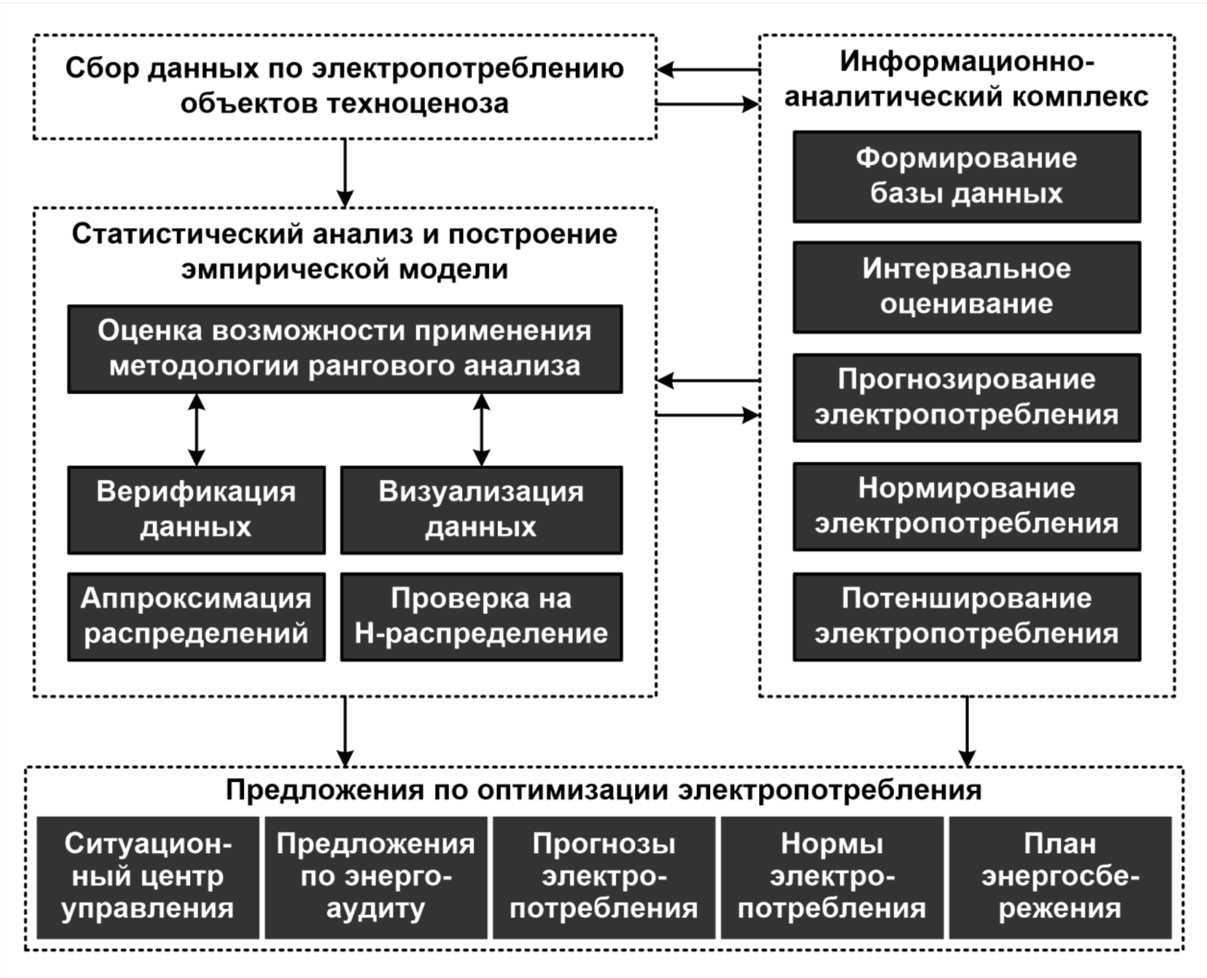

Рис. 3. Стандартные процедуры рангового анализа техноценозов по электропотреблению

Как показал многолетний опыт работы целого ряда научных школ, для корректной обработки данных по электропотреблению объектов региональьных электротехнических комплексов может эффективно применяться методология рангового анализа техноценозов. В частности, разработанная нашей научной школой методика предполагает реализацию следующих стандартных процедур: формирование базы данных по электропотреблению, интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование и потенширование (рис. 3). С целью уточнения получаемых результатов для каждой из стандартных разработана соответствующая тонкая процедура: верификации данных, дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализ (рис. 4) [1-11].

Рис. 4. Тонкие процедуры рангового анализа техноценозов

Следует отметить, что во всех процедурах рангового анализа техноценозов (как стандартных, так и тонких), числовая функция соответствия между предварительно упорядоченным множеством эмпирических значений электропотребления и множеством соответствующих дискретных рангов определяется на основе процедуры установления однозначного функционального соответствия (очевидно, что данная процедура определяется самой сутью параметрического ранжирования в техноценозе).

Технически функциональное соответствие между множествами может быть установлено посредством процедуры аппроксимации, под которой в общем случае понимается научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми. Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики и качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или более удобных объектов (например, таких, характеристики которых легко вычисляются или свойства которых уже известны).

В теории чисел изучаются диофантовы приближения, в частности, приближения иррациональных чисел рациональными. В геометрии рассматриваются аппроксимации кривых ломаными. Некоторые разделы математики, в сущности, целиком посвящены аппроксимации, например, теория приближения функций, численные методы анализа. Теория приближений – раздел математики, изучающий вопрос о возможности приближенного представления одних математических объектов другими, как правило, более простой природы, а также вопросы об оценках вносимой при этом погрешности. Значительная часть теории приближений относится к приближению одних функций другими, однако есть и результаты, относящиеся к абстрактным векторным или топологическим пространствам.

В теории рангового анализа аппроксимация носит фундаментальный характер и реализуется после операции ранжирования для получения числовой функции соответствия множества значений параметра техноценоза множеству определения рангов. В результате получается числовая функция рангового параметрического распределения. Аппроксимация эмпирических распределений в ранговом анализе обладает существенной онтологической спецификой. Если рассматривать совокупность одноименных параметров технических изделий техноценоза как выборку из параметрического пространства, то значение фиксированного параметра конкретного изделия может рассматриваться как случайная величина, а саму выборку в этом случае можно описать как статистическое распределение. Учитывая, что в процессе аппроксимации мы фактически без изменения формы обобщаем конечную выборку эмпирических точек техноценоза до континуума генеральной совокупности, можно заключить, что аппроксимационная форма – это и есть соответствующее вероятностное распределение. Таким образом, в данном случае аппроксимация позволяет перейти от частной эмпирической выборки к вероятностному распределению генеральной совокупности техноценоза [1,11]. Однако, для того чтобы точно определить функцию рангового параметрического распределения, например, по электропотреблению, прежде необходимо рассмотреть фундаментальные понятия ранговой топологии и ранговой топологической меры.

Топология (от древнегреческих «топос» – место и «логос» – слово, учение) – раздел математики, который изучает: в самом общем виде – явление непрерывности; в частности – свойства пространств, которые остаются неизменными при непрерывных деформациях (например – связность, ориентируемость). В частности, ранговая топология – раздел рангового анализа техноценозов, в котором изучаются свойства ранговых параметрических пространств (множеств параметров с дополнительной структурой рангового типа). Двумерным примером рангового параметрического пространства является множество значений одного отдельного параметра, заданное на множестве определения ранговой топологической меры (оба данных множества имеют мощность «алеф 1»). В простейшем случае – это числовая функция рангового параметрического распределения, определенная на множестве ранговой топологической меры, полученная в результате аппроксимации отранжированного множества значений параметра [1,11].

Напомним, ранговая топологическая мера – количественная форма, отражающая качественное свойство объекта обладать большим или меньшим значением параметра. Ранговая топологическая мера численно определяется как помноженная на количество объектов вероятность того, что в техноценозе будет превышено значение параметра, соотносимое с данной ранговой топологической мерой (при условии, что количество объектов стремится к бесконечности). Она дает континуальное обобщение понятия ранга как целочисленной меры близости объектов по значению параметра в упорядоченной последовательности, построенной по убыванию данного параметра. При этом ранги соответствуют целочисленным значениям ранговой топологической меры и задают на ранговом параметрическом распределении граничные значения параметра, близость к которым, в конечном итоге, и ранжирует объекты. Принципиально важным видится то, что континуальная ранговая топологическая мера позволяет достаточно точно определить место произвольного значения параметра на ранговом параметрическом распределении устоявшегося техноценоза [1,11].

В качестве исследуемого параметра здесь мы рассматриваем электропотребление – количественную форму одноименного показателя, фиксируемую счетчиками электроэнергии за интервал времени и определяемую как разность между значениями электропотребления в конце и начале рассматриваемого интервала. Как мы уже отмечали, при стандартизации интервала (час, сутки, месяц, год и т.д.) значение электропотребления конкретного приемника или потребителя электроэнергии в базе данных фиксируется в кВт·ч за принятый промежуток времени [11].

Итак, аналитически ранговое параметрическое распределение по электропотреблению представляет собой числовую функцию, определенную на множестве ранговой топологической меры, полученную в результате аппроксимации отранжированного множества значений электропотребления объектов (приемников, потребителей) техноценоза:

$$[\{W_k\}_{k=1}^{n} \xrightarrow[f:W\to R]{} \{R_k\}_{k=1}^{n}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} W = f(x), \qquad (11)$$

где $\{W_k\}_{k=1}^{n}$ – множество значений электропотребления;

$\{R_k\}_{k=1}^{n}$	–	множество целочисленных значений ранговой топологической меры (соответствующих рангам);
$W(x) = f(x)$	–	функция рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению;
x	–	ранговая топологическая мера.

Таким образом, следует различать два ранговых параметрических распределения одного и того же техноценоза: первое – эмпирическое, построенное на основе обработки данных по электропотреблению, полученных со счетчиков электроэнергии, установленных на объектах; второе – теоретическое, построенное после аппроксимации эмпирических данных. Повторимся и еще раз подчеркнем, что в процессе аппроксимации мы фактически без изменения закона распределения обобщаем конечную выборку эмпирических точек техноценоза до континуума генеральной совокупности. Следовательно, аппроксимационная форма – это и есть соответствующее вероятностное распределение, которое мы должны рассматривать как единственный корректный инструмент рангового анализа [1,11].

Какие задачи позволяет решать подобная аппроксимационная форма рангового параметрического распределения по электропотреблению? Прежде всего, она позволяет определять дробное (межранговое) значение ранговой топологической меры, соответствующее произвольному значению электропотребления. Это позволяет точно позиционировать (с точки зрения ранговой динамики) значение электропотребления, извне привносимое в устоявшийся техноценоз. Заметим, что это имеет большое значение в процедурах параметрического нормирования и синтеза, а также в бифуркационных методах прогнозирования [1-11]. Кроме того, аппроксимационная форма рангового параметрического распределения позволяет корректно вычислять совокупное значение электропотребления техноценоза в целом или отдельного параметрического кластера (например, если его зафиксировать в пределах от x_1 до x_2). Для этого берутся интегралы:

$$\int_0^{\infty} W(x)dx, \quad \int_{x_1}^{x_2} W(x)dx. \qquad (12)$$

Следует отметить, что в первом случае мы имеем дело с несобственным интегралом, который, в общем случае, может быть сходящимся или расходящимся. Однако в теории рангового анализа показано, что несобственные интегралы ранговых параметрических распределений всегда являются сходящимися, т.е. позволяют получать корректные конечные результаты. Более того, сам факт расходимости интеграла является свидетельством, что исследуемое ранговое распределение, по какой-либо причине, не может быть отнесено к области негауссовых. Интегрирование ранговых параметрических распределений применяется в процедурах потенширования и ZP-анализа, а также при определении интегральных показателей качества электропотребления [1,11] (также см. здесь ниже). С целью теоретического обобщения отдельно рассмотрим процедуру дифлекс-анализа техноценозов (рис. 3, 4) в области ранговой топологии.

Однако прежде обсудим еще один не менее важный момент, касающийся понятий электроснабжения и электропотребления в региональном электроэнергетическом комплексе (рис. 1). Как мы уже констатировали, физически электроснабжение и электропотребление являются сторонами единого процесса, однако их теоретическое описание осуществляется в совершенно разных предметных областях. Электроснабжение – обеспечение потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества. Оно осуществляется с целью поддержания в точках раздела с потребителями количественно-качественных показателей электроэнергии, при условии выполнения требований надежности. Очевидно, что показатели качества электроснабжения не отражают качество процесса электропотребления, под которым понимается управляемый (фиксируемый в базе данных, оцениваемый, прогнозируемый, нормируемый и потеншируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками или потребителями, осуществляемый автономно либо в составе техноценоза. Управление электропотреблением осуществляется с целью обеспечения приемников или потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества с максимальной экономией электроэнергии и минимизацией затрат на всестороннее обеспечение данного процесса. Таким образом, электропотребление как процесс должно описываться комплексным показателем, характеризующим как количественную, так и качественную стороны. Очевидно, что собственно электропотребление как показатель этому требованию не отвечает, так как отражает только количественную сторону.

Ранее нами в рамках процедуры дифлекс-анализа был предложен параметр, описывающий качество процесса электропотребления [1,11]. Напомним, что дифлекс-анализ – тонкая процедура рангового анализа техноценозов, осуществляемая на этапе интервального оценивания с целью разработки оптимального плана углубленных обследований «аномальных» объектов на среднесрочную перспективу (до 5 – 7 лет) (рис. 3, 4). Предполагается, что в качестве источника данных используется база данных по электропотреблению за 10 – 15 лет, а интервальное оценивание проводится с целью определения границ области допустимых значений. Нижняя граница области допустимых значений – гиперболическая кривая, полученная в результате аппроксимации нижних границ доверительных интервалов, рассчитанных для каждого из рангов рангового параметрического распределения. Построение области допустимых значений на основе значений электропотребления рангов позволяет учесть системное влияние техноценоза на объекты, а объектов на техноценоз. При этом исследование различных техноценозов позволило подтвердить предположение о нормальном распределении значений электропотребления внутри рангов [1-11].

Предполагалось, что основным параметром процедуры дифлекс-анализа является дифлекс-параметр, под которым понимается отклонение (абсолютное или относительное) эмпирического значения электропотребления объекта техноценоза от нижней границы области допустимых значений. Учитывая пока сугубо эмпирический характер данного параметра, предлагается его отныне называть ранговым дифлекс-параметром.

Как было уже сказано выше, аппроксимация рангового параметрического распределения по электропотреблению позволяет перейти от частной эмпирической выборки к вероятностному распределению генеральной совокупности. Это позволяет ввести понятие ранговой топологической меры и определить топологический дифлекс-параметр (для простоты далее мы будем его именовать просто дифлекс-параметром) (рис. 5).

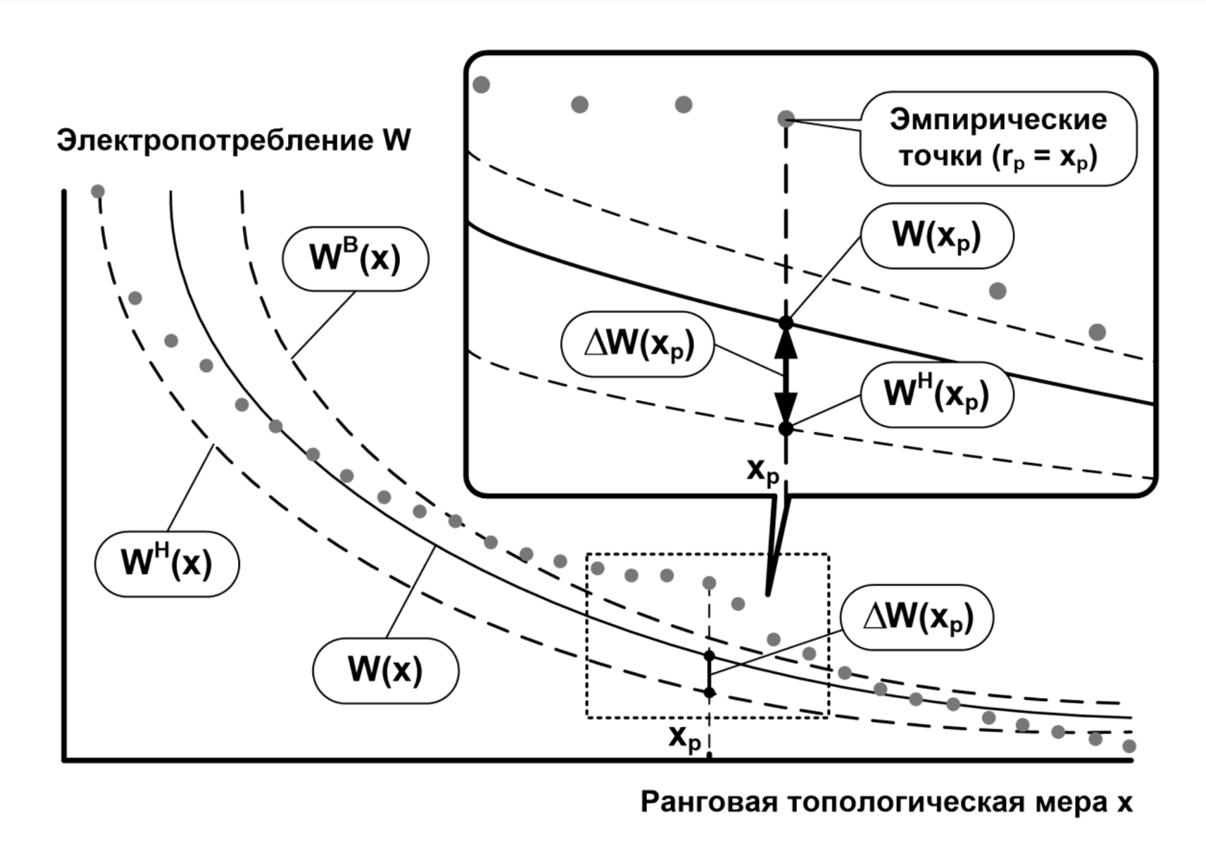

Рис. 5. К понятию топологического дифлекс-параметра техноценоза по электропотреблению

Подобное континуальное представление позволяет впервые установить функциональное соответствие между областью значений дифлекс-параметра и множеством значений ранговой топологической меры:

$$\Delta W(x_p) = W(x_p) - W^{Н}(x_p), \tag{13}$$

где $W(x_p)$ – значение электропотребления, соответствующее расчетному значению на аппроксимационной кривой;

$W^{Н}(x_p)$ – значение электропотребления на нижней границе области допустимых значений.

Остается задача полноценной характеристики процесса электропотребления одновременно как с количественной, так и с качественной точек зрения, которая здесь впервые решается введением принципиально новых понятий. Первое из них – ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза, под которой понимается заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция двух переменных, ставящая в однозначное соответствие множеству значений топологического дифлекс-параметра множество значений электропотребления и ранговой топологической меры. Второе – ранговое гиперпараметрическое распределение техноценоза, под которым понимается заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция трех переменных, ставящая в соответствие множеству значений дифлекс-параметра множество значений электропотребления, ранговой топологической меры, а также дифлекс-угла. Обе функции могут быть получены в результате аппроксимации:

$$\begin{cases} \{\Delta W_p\}_{p=0}^{+\infty} \xrightarrow[f:\,\Delta W \to W,X]{} \{W_p, X_p\}_{p=0}^{+\infty}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} \Delta W(W,x); \\ \{\Delta W_p\}_{p=0}^{+\infty} \xrightarrow[f:\,\Delta W \to W,X,A]{} \{W_p, X_p, A_p\}_{p=0}^{+\infty}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} \Delta W(W,x,\alpha), \end{cases} \tag{14}$$

где $\{\Delta W_p\}_{p=0}^{+\infty}$ – множество значений дифлекс-параметра;

$\{W_p, X_p\}_{p=0}^{+\infty}$ – множество значений электропотребления и ранговой топологической меры;

$\{W_p, X_p, A_p\}_{p=0}^{+\infty}$ – множество значений электропотребления, топологической меры и дифлекс-угла.

Ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза описывается уравнением аффинной поверхности второго порядка, а ранговое гиперпараметрическое распределение – уравнением рациональной кривой второго порядка (о дифлекс-угле будет сказано ниже) (рис. 6):

$$\begin{cases} \Delta W = f(W,x); \\ \Delta W = f(W,x,\alpha). \end{cases} \tag{15}$$

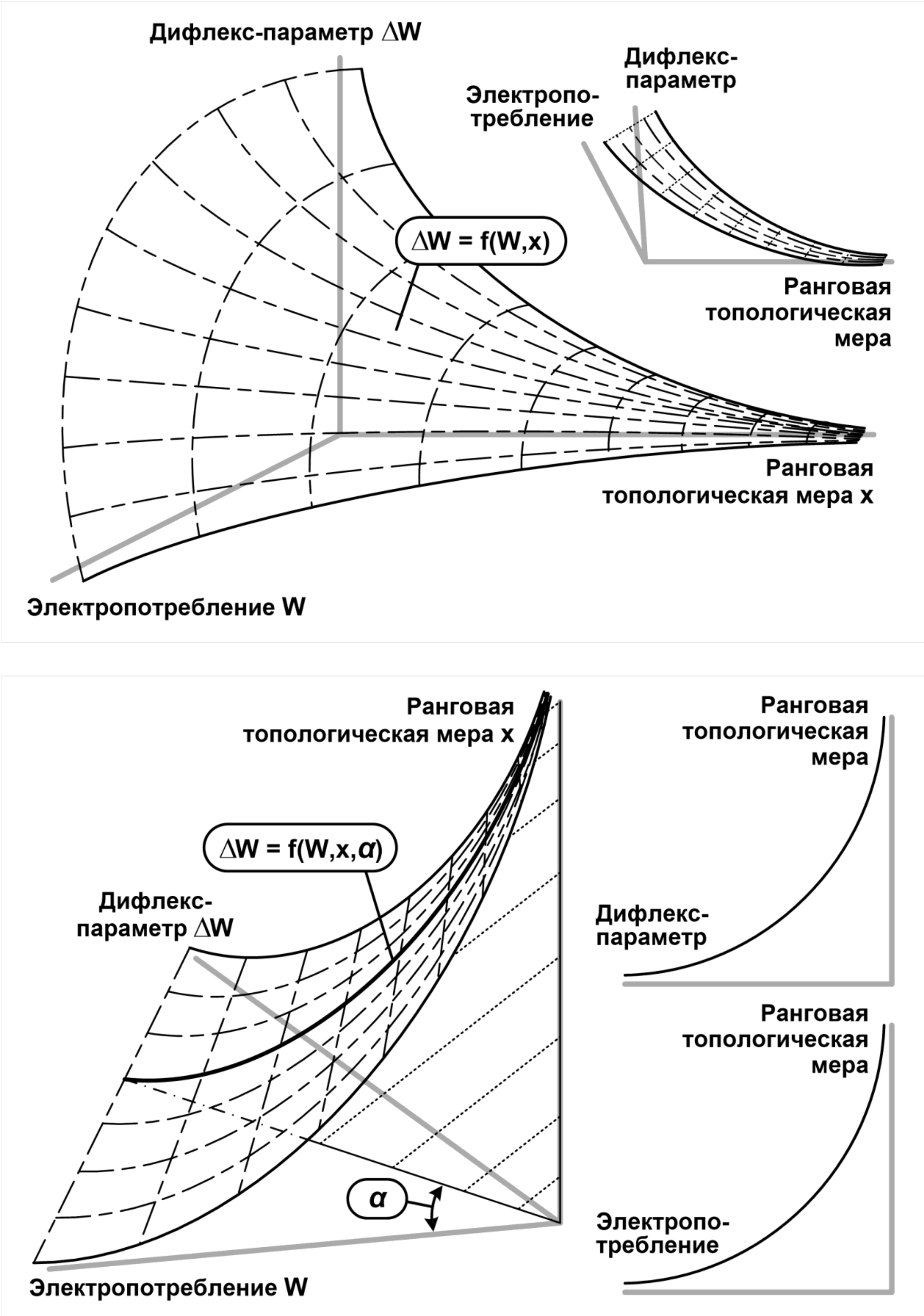

Рис. 6. Ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение

Это гиперболические, соответственно, аффинная поверхность и кривая второго порядка, с одной стороны асимптотически сходящиеся к координатной оси ранговой топологической меры, а с другой – асимптотически приближающиеся к координатной плоскости $\langle \Delta W \bigcirc W \rangle$ (рис. 6).

Ранговая гиперпараметрическая поверхность, изображенная на рисунке 6 штриховыми линиями, показывает, своего рода, спектр теоретически возможных форм рангового гиперпараметрического распределения техноценоза, определяемых его электропотреблением за обозримый промежуток времени. Поверхность возможных форм гиперпараметрического распределения ограничена сектором положительных значений осей дифлекс-параметра, электропотребления и ранговой топологической меры. С координатными плоскостями $\langle W \bigcirc x \rangle$ и $\langle \Delta W \bigcirc x \rangle$ она имеет пересечения, которые являются гиперболическими кривыми первого порядка для рангового параметрического распределения: в первом случае – по электропотреблению, а во втором – по дифлекс-параметру. Кривая рангового гиперпараметрического распределения техноценоза является пересечением ранговой гиперпараметрической поверхности с секущей плоскостью, проходящей через координатную прямую $\langle x \rangle$. Континуум возможных положений секущей плоскости образует пучок в положительном секторе между координатными осями $\langle W \rangle$ и $\langle \Delta W \rangle$. Очевидно, что форма рангового гиперпараметрического распределения зависит от угла поворота секущей плоскости по отношению к координатной плоскости $\langle W \bigcirc x \rangle$, который обозначен на рисунке как α. Именно его предлагается называть дифлекс-углом рангового гиперпараметрического распределения техноценоза.

Как представляется, положение секущей плоскости и, соответственно, угол α зависят от состояния техноценоза, а также внешних управляющих воздействий в рассматриваемый момент времени. Примечательно, что крайние («вырожденные») состояния техноценоза соответствуют следующим дифлекс-углам (в градусах): $\alpha = 0$ – состояние с нулевым дифлекс-параметром во всем диапазоне значений электропотребления; $\alpha = 90$ – состояние с нулевым электропотреблением во всем диапазоне значений дифлекс-параметров. Состояние с $\alpha = 0$ соответствует техноценозу, все приемники и потребители которого потребляют электроэнергию на нижней границе области допустимых значений, однако его интегральное электропотребление в этом случае будет максимальным. Это состояние можно считать начальным в общем процессе управления электропотреблением. Состояние с $\alpha = 90$ соответствует техноценозу, интегральное электропотребление которого равно нулю, что, по сути, означает полное прекращению процесса электропотребления. Очевидно, что реальный техноценоз всегда будет соответствовать какому-то промежуточному значению дифлекс-угла α, который в процессе оптимального управления электропотреблением должен последовательно увеличиваться до своего целевого значения α^*. При этом мы получаем состояние, своего рода, минимакса: минимальный интегральный дифлекс-параметр при максимальном значении дифлекс-угла, т.е. минимуме интегрального электропотребления техноценоза. Другими словами, в данном случае техноценоз достигает состояния наивысшей энергоэффективности, что, в известном смысле, можно считать целью процесса управления электропотреблением.

Что же нам дают впервые описанные здесь инструменты? Как представляется, именно ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение позволяют корректно решить поставленную выше задачу количественно-качественного описания процесса электропотребления техноценоза. Прежде всего, рассмотрим поверхностный интеграл вида:

$$\int_S \Delta W(W, x)\, ds, \tag{16}$$

где $\Delta W(W, x)$ – скалярная функция, определенная на ранговой гиперпараметрической поверхности;
ds – бесконечно малый элемент поверхности.

В данном случае мы имеем дело с поверхностным интегралом первого рода на скалярном поле, вычисляемым по аффинной поверхности второго порядка $\Delta W(W, x)$ в трехмерном пространстве $\langle \Delta W \bigcirc W \bigcirc x \rangle$. Рассчитав интеграл в бесконечных пределах параметризации, мы получаем, так называемый, интегральный дифлекс-параметр техноценоза по электропотреблению ΔW_Σ. Очевидно, что данный параметр характеризует процесс электропотребления, прежде всего, с качественной точки зрения.

Дополним параметр (16) количественным условием, построим целевые функции и введем комплексный критерий оценки вида:

$$\begin{cases} \Delta W_\Sigma = \int_S \Delta W(W, x)\, ds \xrightarrow[{[0;+\infty)\subset\mathbb{R}^3}]{} \min; \\ \alpha = \xrightarrow[{\left\{\alpha\to\alpha^*\right\}\equiv\left\{W_\Sigma = \int_0^{+\infty} W(x)\,dx \to W_\Sigma^*\right\}}]{} \max; \\ \Delta W \ge 0;\ W \ge 0;\ x \ge 0;\ W_\Sigma \ge W_\Sigma^*; \\ \alpha = \operatorname{arctg}\left(\Delta W_p / W_p\right),\ 0^\circ \le \alpha \le 90^\circ. \end{cases} \tag{17}$$

Интегральный дифлекс-параметр на фиксированной стадии управления ($\alpha = \text{const}$) может быть определен как криволинейный интеграл:

$$
\begin{cases} \Delta W_\Sigma = \int\limits_\ell \Delta W(W, x, \alpha)\, d\ell; \\ \alpha = \text{const}, \end{cases} \tag{18}
$$

где $\Delta W(W, x, \alpha)$ – скалярная функция, определенная на ранговом гиперпараметрическом распределении;

$d\ell$ – бесконечно малый элемент кривой рангового гиперпараметрического распределения.

Как представляется, аналитическая форма рангового гиперпараметрического распределения техноценоза может быть определена теоретически методами дифференциальной геометрии либо эмпирически путем аппроксимации имеющихся данных по электропотреблению.

Таким образом, наилучшим можно считать процесс электропотребления техноценоза, минимизирующий интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Если же сравнивать текущее значение интегрального дифлекс-параметра техноценоза с его значением в оптимальном состоянии, то можно получить параметр, который правомерно интерпретировать как количественную меру ущерба, наносимого техноценозу за счет недостаточной энергоэффективности процесса электропотребления, который предлагается называть интегральным дамадж-параметром (от англ. «damage»). С учетом текущего тарифа можно записать (рис. 7):

$$
\begin{cases} D_\Sigma^w = \Delta W_\Sigma^t - \Delta W_\Sigma^*; \\ D_\Sigma^f = \left(\Delta W_\Sigma^t - \Delta W_\Sigma^*\right) \cdot sc, \end{cases} \tag{19}
$$

где D_Σ^w – интегральный дамадж-параметр техноценоза, кВт·ч\Т;

D_Σ^f – интегральный дамадж-параметр техноценоза, пересчитанный в соответствии с текущим тарифом на электроэнергию и выраженный в денежном исчислении;

ΔW_Σ^t – текущий интегральный дифлекс-параметр, кВт·ч\Т;

ΔW_Σ^* – интегральный дифлекс-параметр, соответствующий оптимальному электропотреблению техноценоза;

sc – текущий тариф на электроэнергию.

В заключение заметим, что критерий (17) позволяет оценивать техноценоз в статическом состоянии на заданный момент времени. Существенные перспективы таит в себе переход к динамической оценке, что потребует введения динамических дифлекс-функционалов (t – время):

$$\begin{cases} \Delta W(t) = F^{w}(W(t), x(t)); \\ \alpha(t) = F^{\alpha}(W(t), x(t)). \end{cases} \quad (20)$$

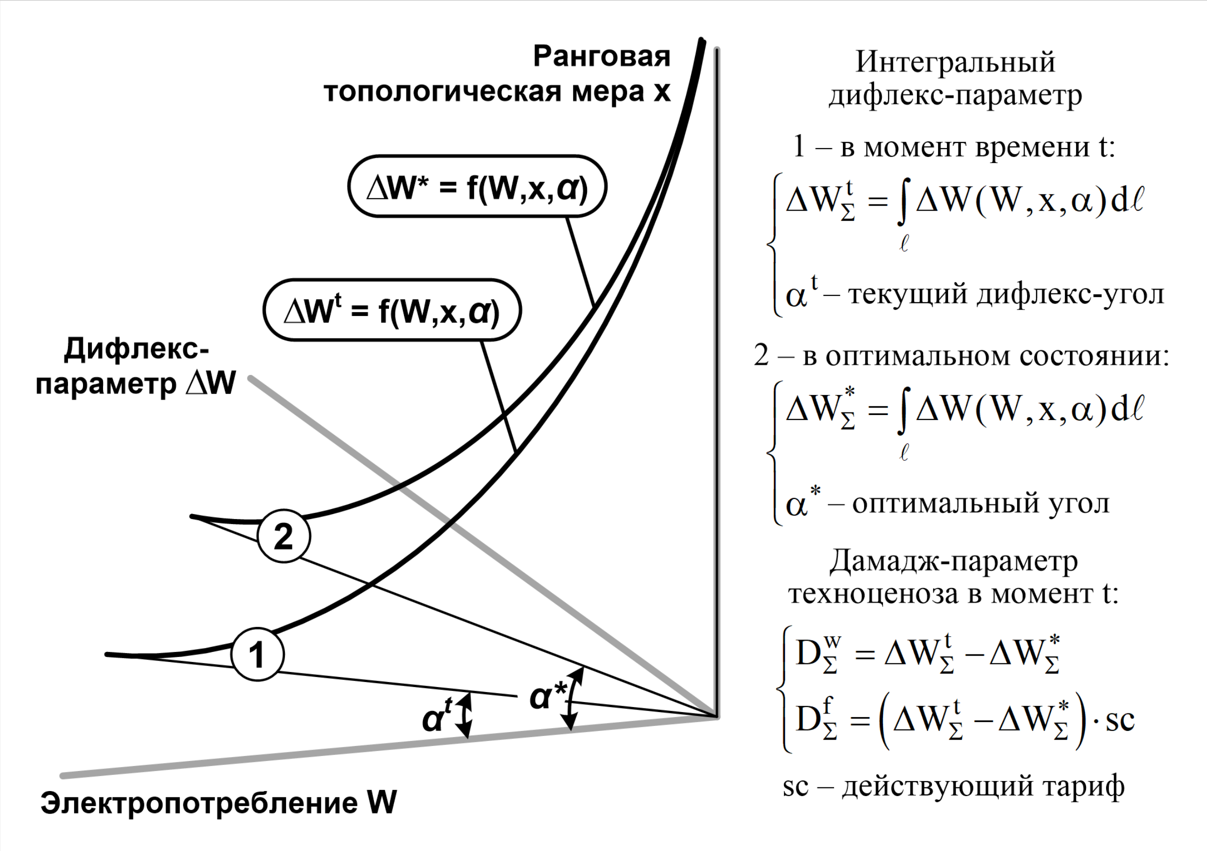

Рис. 7. К понятию дамадж-параметра техноценоза

Таким образом, оперирование в ранговом анализе техноценозов гиперпараметрическими поверхностями и гиперпараметрическими распределениями дает ряд существенных преимуществ. В первую очередь это создает возможность комплексной оценки процесса электропотребления одновременно как с количественной, так и с качественной точек зрения. Так, в соответствии с критерием (17) наилучшим с количественной и качественной точек зрения можно считать процесс электропотребления техноценоза, минимизирующий интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Реализация процедур прогнозирования применительно к дифлекс-функционалам (20) позволяет оценить параметрическую динамику техноценоза с учетом критерия (17) на заданном горизонте. Количественно меру ущерба, наносимого техноценозу за счет недостаточной энергоэффективности процесса электропотребления, можно определить с помощью, так называемого, интегрального дамадж-параметра (19).

Литература

1. Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – М.: [б.и.], [2000]. – Режим доступа: http://www.gnatukvi.ru, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].
2. Гнатюк В.И., Шейнин А.А. Нормирование электропотребления регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. – М.: ИНП РАН, 2012. – 102 с.
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Статья] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf, свободный.
4. Гнатюк В.И., Луценко Д.В. Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. – М.: Изд-во ИНП РАН, 2013. – 107 с.
5. Гнатюк В.И. Потенциал энергосбережения техноценоза [Трактат] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2013]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf, свободный.
6. Гнатюк В.И. Философские основания техноценологического подхода [Монография] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/mono_pdf/text.pdf.
7. Гнатюк В.И. и др. Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса. – Калининград: КГТУ, 2015. – 106 с.
8. Гнатюк В.И. Управление электропотреблением на основе трансформированных ранговых распределений [Презентация] / В.И. Гнатюк. – Электронные данные. – Калининград: [б.и.], [1994 – 2016]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/pres_small/pres.pps, свободный.
9. Gnatyuk, V. Potential of energy saving as a tool for increasing the stability / Viktor I. Gnatyuk, Gennady V. Kretinin, Oleg R. Kivchun, Dmitry V. Lutsenko // International journal of energy economics and policy. – ISSN 2146-4553. – Mersin: Cag University. – 2018. – No 8 (1). – P. 137 – 143.
10. Луценко Д.В. Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат] / Д.В. Луценко. – Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2018]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf, свободный.
11. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / В.И. Гнатюк. – 3-е изд., перераб. и доп. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2019]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/ind.html, свободный.