

Перспективы развития теории

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТЕХНОЦЕНОЗА ПО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЮ

Объектом наших исследований является региональный электротехнический комплекс, который 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. Наш объект исследования выступает в качестве подсистемы регионального электроэнергетического комплекса, 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 цель электроснабжения (рис. 1) [83,108].



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 [83,108].

Очевидно, что в теории оптимального управления электропотреблением техноценозов, собственно понятие «электропотребление» занимает центральное место, однако, в его толковании имеется ряд проблем. Сразу отметим, что электропотребление, в зависимости от контекста, объекта, предмета и области исследований, может рассматриваться в трех различных смыслах: как показатель, как параметр и как процесс [83,108].

Как показатель электропотребление – мера, отражающая свойство объектов окружающего мира преобразовывать генерируемую источниками электромагнитную энергию (энергию электромагнитного поля, слагаемую из энергий электрического и магнитного полей). Процесс преобразования энергии сопровождается работой электрического поля по перемещению зарядов, а также работой магнитного поля по перемещению элементарных проводников с током. Часть этой энергии (активная) необратимо преобразовывается в другие виды энергии (механическую, тепловую, химическую и др.), а часть (реактивная) – циклично запасается в виде электромагнитного поля в объекте, а затем отдается обратно в источник.

Как параметр электропотребление – количественная форма одноименного показателя, фиксируемая счетчиками электроэнергии за интервал времени и определяемая как разность между значениями электропотребления в конце и начале рассматриваемого интервала. В случае стандартизации интервала времени (час, сутки, месяц, квартал, год и т.д.) значение электропотребления конкретного приемника или потребителя электроэнергии в базе данных будет фиксироваться в кВт·ч (кВАр·ч, кВА·ч) за принятый промежуток времени. При этом появляется возможность строить функции времени или временные ряды электропотребления для отдельных приемников или потребителей электроэнергии, а также ранговые параметрические распределения по электропотреблению для техноценозов. Кроме того, становится возможным интегрирование функций времени и ранговых распределений с целью определения, соответственно, суммарных значений электропотребления отдельных приемников или потребителей электро-

энергии либо потенциалов энергосбережения техноценоза в целом. Энергосбытовые компании зачастую называют этот параметр «расход электроэнергии», однако, с точки зрения потребителя – это не «расход», а «потребление электроэнергии», т.е., не что иное, как «электропотребление».

Следует иметь в виду, что в данном случае мы имеем дело с понятием, так называемого, дифференциального (от англ. «difference») электропотребления, отражающего разницу в электропотреблении приемника или потребителя в конце и начале стандартизированного (заранее оговоренного) промежутка времени. Данное понятие отличается от электропотребления как показателя, поэтому предлагается его называть «дифференциальным электропотреблением». В качестве единицы измерения здесь следует использовать внесистемную единицу  $\text{kВт} \cdot \text{ч} / T$  ( $\text{kВАр} \cdot \text{ч} / T$ ,  $\text{kВА} \cdot \text{ч} / T$ ), где  $T$  – стандартизированный интервал времени (час, сутки, месяц, год и т.д.).

Как процесс электропотребление – управляемый (фиксируемый в базе данных, дифлексируемый, прогнозируемый, нормируемый и потенцируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками или потребителями, осуществляемый автономно либо в составе техноценоза. Управление электропотреблением осуществляется с целью максимальной экономии электроэнергии при минимизации затрат на всестороннее обеспечение данного процесса. Вводится понятие «показателя качества электропотребления» приемника или потребителя, под которым понимается мера минимизации потребления электроэнергии, при условии обязательного выполнения основных функциональных задач по предназначению. Количественно данный показатель может быть оценен с помощью абсолютного или относительного дифлекс-параметра, под которым понимается отклонение (абсолютное или относительное) значения электропотребления приемника или потребителя техноценоза от нижней границы области допустимых значений, построенной в процедуре дифлекс-анализа рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению [83,108].

Как известно [83,108], основным методом исследования и оптимального управления региональными электротехническими комплексами является ранговый анализ – метод исследования больших технических систем (техноценозов), имеющий целью их статистический анализ, а также оптимизацию, моделирование и управление. Состоит из трех разделов, первый из которых – функциональный ранговый анализ – полагает в качестве основного критерия форму видовых и ранговых распределений [108]. Второй раздел – комбинаторный ранговый анализ – основан на свойствах, отношениях, а также закономерностях ранговых конфигураций и структур [229]. Важным инструментом третьего раздела – векторного рангового анализа – выступает векторная мера параметрической близости в ранговом параметрическом пространстве [180]. Включает стандартные процедуры параметрического нормирования, интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования потребления ресурсов. Более тон-

кий анализ рангового параметрического распределения позволяет существенно повысить эффективность рангового анализа. Он осуществляется в рамках следующих (так называемых «тонких») процедур: дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (прогнозирования), ASR-анализа (нормирования) и ZP-анализа (потенширования) [83,108].

Однако вернемся в рамки функционального рангового анализа, где центральное место занимает понятие распределения, под которым, в самом общем случае, понимается 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 всегда дискретно на множестве значений случайной величины. Как идеализация статистического распределения в ситуации, когда объем выборки из генеральной совокупности стремится к бесконечности, возникает непрерывное вероятностное распределение [83,108].

Ключевым моментом в методологии рангового анализа являются понятия негауссовости и ципфовости гиперболических распределений. 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 наблюдаемых 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 [83,108].

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:

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

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

По С.Д. Хайтуну [377-380], распределение Ципфа ципфово, ципфовое же распределение в общем случае не является распределением Ципфа. Вероятностное ципфовое распределение гауссово при значениях показателя распределения  $\alpha \geq 2$  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.

Кроме того, 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 [86,108]. Следовательно, для их статистического описания особое значение имеет распределение Ципфа с  $\alpha < 2$ , которое удовлетворяет известной предельной теореме Гнеденко – Деблина. В теореме доказывается, что для сходимости распределений нормированных сумм одинаково распределенных независимых случайных величин к устойчивым распределениям, отличным от нормального, необходимо и достаточно, чтобы при  $W \rightarrow \infty$  наблюдалась асимптотическая, сильная эквивалентность функций [377-380]:

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

где  $C_1, C_2, \alpha$  – параметры распределения Ципфа;  
 $h_i(w)$  – функции, медленно меняющиеся в смысле Карамата, т.е. такие, что для всех  $t > 0$  имеет место предельное равенство:  $\lim_{w \rightarrow \infty} \frac{h_i(t \cdot w)}{h_i(w)} = 1$ .

Распределение Ципфа, как и любое другое, имеет частотную и ранговую формы. В частотной форме, как правило, представляются гауссовы распределения с устойчивыми первыми и конечными вторыми моментами, в ранговой – негауссовы ранговые видовые и ранговые параметрические (по видообразующим или функциональным параметрам). Частотная дифференциальная форма вероятностного распределения Ципфа описывается приведенным выше выражением (1). Его частотная интегральная форма (как правило, выражаемая через функцию распределения) для выборки определенного объема выглядит следующим образом [377-380]:

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

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

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

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

где  $A, B, \beta$  – формальные параметры распределения;  
 $x$  – ранговая топологическая мера.

Настало время подробно обсудить понятие ранговой топологической меры, под которой понимается 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 [108]). Итак, для любого расчетного значения ранговой топологической меры можем записать:

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

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

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

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

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

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  $\alpha$  следующим образом [108,377-380]:

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

где  $W_0$  и  $W_m$  – минимальное и максимальные значения  $W$ .

Система (7) позволяет учесть эффект рангового искажения, который описан у С.Д. Хайтуна [377-380]. При этом один из пяти параметров распределения Ципфа (в случае применения (7) – это, как правило,  $\alpha$ ) должен быть определен априорно по имеющимся эмпирическим данным.

Для оценки степени негауссовости распределения случайной величины  $W$  могут быть использованы полученные С.Д. Хайтуном в [377-380] теоретические зависимости первых двух центральных моментов распределения (математического ожидания и дисперсии) от значения  $W_m$ :

$$\frac{M}{W_0} = \frac{\int_0^{W_m/W_0} y^{-\alpha} dy}{\int_0^{W_m/W_0} y^{-(1+\alpha)} dy};$$

$$\frac{D}{W_0^2} = \frac{\int_0^{W_m/W_0} (y - (M/W_0))^2 y^{-(1+\alpha)} dy}{\int_0^{W_m/W_0} y^{-(1+\alpha)} dy},$$
(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).

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 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 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, в качестве которого выступает региональный электротехнический комплекс как техноценоз (рис. 1), а в качестве параметра – дифференциальное электропотребление (далее – просто электропотребление) [83,108].

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:

$$\{W_k\}_{k=1}^n, \quad (9)$$

где  $W_k$  – значение электропотребления  $k$ -го объекта техноценоза;  
 $n$  – общее количество объектов в техноценозе.

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

$$\{W_k\}_{k=1}^n \xrightarrow{f: W \rightarrow R} \{R_k\}_{k=1}^n, \quad (10)$$

где  $\{R_k\}_{k=1}^n$  – множество возможных рангов объектов;  
 $f: W \rightarrow R$  – 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 низкого 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 появляет-

ся 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 участников процесса электропотребления – элементарных частиц и полей, из которых состоят все объекты окружающего материального мира (в т.ч. и подсистемы приемников электроэнергии).

Следовательно, в ранговом параметрическом распределении множество значений электропотребления  $\{W\}$  представляет собой счетное множество, составляющее биекцию с множеством натуральных чисел  $\{N\}$ :

$$\{W\} \leftrightarrow \{N\}. \quad (11)$$

При этом разбиение множества значений электропотребления техноценоза на подмножества может осуществляться следующим образом:

$$\begin{aligned} \{W_1\} &\xrightarrow{W_1=W_\Sigma} \{R_1 = 1\}; \\ \{W_1, W_2\} &\xrightarrow{W_1+W_2=W_\Sigma} \{R_1 = 1, R_2 = 2\}; \\ \{W_1, W_2, W_3\} &\xrightarrow{W_1+W_2+W_3=W_\Sigma} \{R_1 = 1, R_2 = 2, R_3 = 3\}; \\ &\dots \dots \dots \\ \{W_1, W_2, \dots, W_n\} &\xrightarrow{W_1+W_2+\dots+W_n=W_\Sigma} \{R_1 = 1, R_2 = 2, \dots, R_n = n\}; \\ &\dots \dots \dots \\ \{W_k\}_{k=1}^\infty &\xrightarrow{\sum_{k=1}^\infty W_k=W_\Sigma} \{R_k\}_{k=1}^\infty, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $W_\Sigma$  – суммарное электропотребление техноценоза.

В разбиении (12) просматривается принцип самоподобия, т.к. всегда существует конечное множество  $\{S\}$ , индексирующее набор несюръективных отображений  $\{f_s\}_{s \in \{S\}}$ , для которых (по данным группы исследователей, публиковавшихся под псевдонимом «Никола Бурбаки») [189]:

$$\{W\} = \cup_{s \in \{S\}} f_s(\{W\}_i), \quad (13)$$

где  $\{W\}_i$  –  $i$ -ое разбиение множества  $\{W\}$  на подмножества (нумерация разбиений в (12) указана сверху вниз);  
 $s$  – индекс несюръективного отображения  $f$ ;  
 $i$  – индекс разбиения множества на подмножества.

Если исходить из того, что множество значений электропотребления является единственным непустым подмножеством в однопараметрическом множестве общего параметрического описания регионального электротехнического комплекса как техноценологического объекта, для которого уравнение (13) выполняется при заданном семействе несюръективных отображений  $\{f_s\}_{s \in \{S\}}$ , то можно судить, что в данном случае мы имеем дело со статистически самоподобной структурой следующего вида [189]:

$$\Psi_W = (\{W\}, \{S\}, \{f_s\}_{s \in \{S\}}). \quad (14)$$

Можно проитерировать данные отображения так, что в результате получится система итерированных функций ранговых параметрических распределений по электропотреблению, композиция которых порождает алгебраическую фракталоподобную структуру. Следует, однако, учитывать важное ограничение самоподобия, связанное с обязательной негауссовостью формы распределений, которая должна каждый раз проверяться по (8). Это означает, что в разбиении (12) остаются только те варианты, которые удовлетворяют условию проверки по (8) и описываются формой (4). Другими словами, можно заключить, что каждое из удовлетворяющих условию негауссовости разбиений регионального электротехнического комплекса на объекты (определенного уровня), для которых ведется учет электропотребления, статистически подобно как техноценозу в целом, так и его частям, также удовлетворяющим условию негауссовости. Сам техноценоз, при этом, может рассматриваться как фракталоподобная среда.

С другой стороны, в соответствии с аксиомой существования булеана (аксиомой множества подмножеств), можно заключить, что из любого счетного множества значений электропотребления техноценоза  $\{W\}^{\aleph=0}$  можно образовать булеан, то есть такое дисконтинуальное множество  $\{W_d\}^{\aleph=1}$ , которое состоит из всех собственных и несобственных счетных подмножеств  $\{W_n\}^{\aleph=0}$  данного множества  $\{W\}^{\aleph=0}$ . Согласно теории множеств математически эта аксиома записывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall \{W\}^{N=0} \exists \{W_d\}^{N=1} \forall \{W_n\}^{N=0} (\Theta_1), \\ (\Theta_1) \equiv \left( \{W_n\}^{N=0} \in \{W_d\}^{N=1} \leftrightarrow \forall \{W_c\}^{N=1} (\Theta_2) \right), \\ (\Theta_2) \equiv \left( \{W_c\}^{N=1} \in \{W_n\}^{N=0} \rightarrow \{W_c\}^{N=1} \in \{W\}^{N=0} \right). \end{array} \right. \quad (15)$$

Заметим, что в аксиоме булеана указан лишь тип подмножеств множества  $\{W\}^{N=0}$ , которые должны быть элементами образуемого множества  $\{W_d\}^{N=1}$ . Что касается различия в мощности самого множества  $\{W\}^{N=0}$  и множества его подмножеств  $\{W_d\}^{N=1}$ , то здесь сошлемся на классическое утверждение теории множеств – теорему Кантора, которая утверждает, что любое множество  $\{W\}^{N=0}$  менее мощно, чем множество всех его подмножеств  $\{W_d\}^{N=1}$ . Кроме того, руководствуясь аксиомой объемности, можно доказать единственность булеана для каждого множества значений электропотребления техноценоза  $\{W\}^{N=0}$ . Вместе с тем, аксиома булеана не содержит алгоритм нахождения всех элементов образуемого множества  $\{W_d\}^{N=1}$ . С учетом выражений (4), (5) и (10):

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_k\}_{k=0}^{\infty} \xrightarrow{f:W \rightarrow X} \{X_k\}_{k=0}^{\infty}, \\ X = \lim_{n \rightarrow \infty} \{ (P(W > W(x))) \cdot n \}. \end{array} \right. \quad (16)$$

Таким образом, с точки зрения электропотребления в техноценозе мы имеем дело с фракталоподобной дисконтинуальной средой. В настоящее время во многих областях показано, что подобные среды при их параметрическом описании генерируют негауссовы выборки. В процессе мониторинга регионального электротехнического комплекса мы чаще всего получаем устойчивые негауссовы безгранично делимые распределения по электропотреблению конечной размерности с бесконечной дисперсией, которые являются композицией бесконечного числа независимых случайных гауссовых процессов и пуассоновских потоков [83,108].

Проблема негауссовости распределений решена в рамках теории оптимального управления электропотреблением, которая разрабатывалась нашей научной школой в четыре этапа, на первом из которых была создана статическая модель управления электропотреблением (рис. 2).

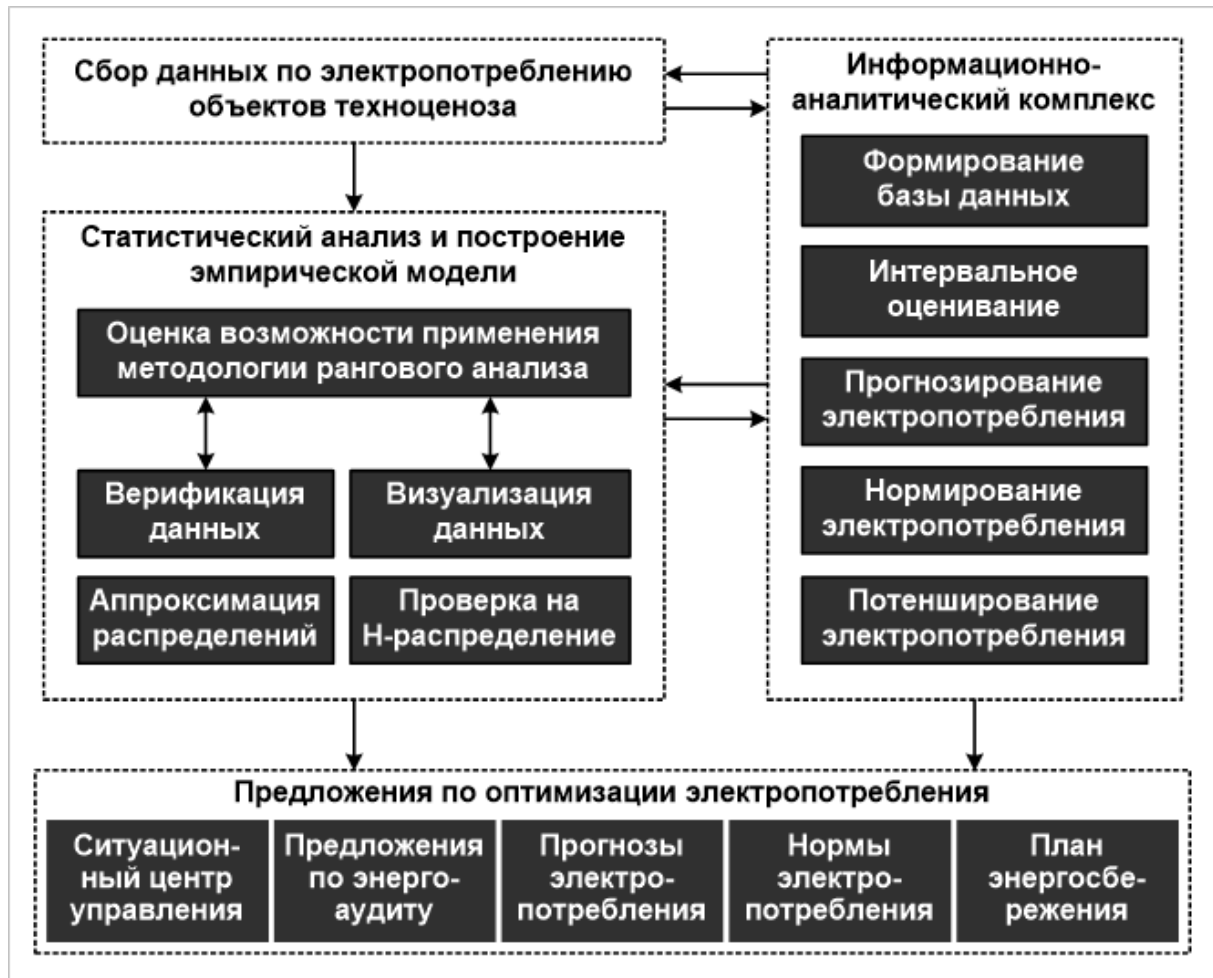


Рис. 2. Статическая модель электропотребления техноценоза

Стандартными процедурами модели стали интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование и потенширование, которые с целью уточнения были дополнены тонкими процедурами дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализа (рис. 3). Дифлекс-анализ – тонкая процедура рангового анализа техноценоза, осуществляемая на этапе интервального оценивания с целью разработки оптимального плана углубленных обследований «аномальных» объектов на среднесрочную перспективу (до 5 лет). GZ-анализ – тонкая процедура рангового анализа, осуществляемая на этапе прогнозирования с целью повышения точности прогнозирования электропотребления на среднесрочную перспективу (до 5 лет). В основе GZ-анализа лежит оценка коэффициента когерентности объектов. ASR-анализ – тонкая процедура рангового анализа, осуществляемая на этапе нормирования с целью уточнения норм электропотребления объектов техноценоза. Реализация процедуры ASR-анализа заключается в добавлении к прогнозируемому среднекластерному значению нормы электропотребления объекта соответствующей его рангу ASR-нормы. ZP-анализ – осуществляемая на этапе потен-

ширования тонкая процедура рангового анализа, имеющая целью разработку ZP-плана электропотребления техноценоза и состоящая из этапов ZP-нормирования, ZP-планирования, а также мониторинга конверсии.



Рис. 3. Тонкие процедуры рангового анализа

Статическая модель позволяла довольно хорошо решать задачи управления электропотреблением техноценозов на небольших горизонтах прогнозирования, однако обладала рядом недостатков, основными из которых были отсутствие внутренних обратных связей управления, а также неразвитость критериальной системы оценки эффективности [83,108].

На третьем этапе развития теории статическая модель была дополнена потоком данных для обратной связи и преобразована в динамическую адаптивную модель, отражение процесса электропотребления в которой осуществлялось с помощью преобразующих функций, построенных на основе законов распределения Вейбулла – Гнеденко и нормального (рис. 4). В качестве критерия эффективности использовался целевой функционал, основанный на соотношении относительных интегральных показателей качества и затрат, а также системе ограничений, являющихся следствием закона оптимального построения техноценозов. Это позволило существенно расширить горизонт прогнозирования и заложить научные основы для реализации внутренних управленческих обратных связей. Однако и в динамической адаптивной модели электропотребления оставался недостаток, заключающийся в том, что она не содержала методологии для реализации

внешних управляющих воздействий, и это потребовало дальнейшего развития нашей теории уже на очередном четвертом этапе [83,108].

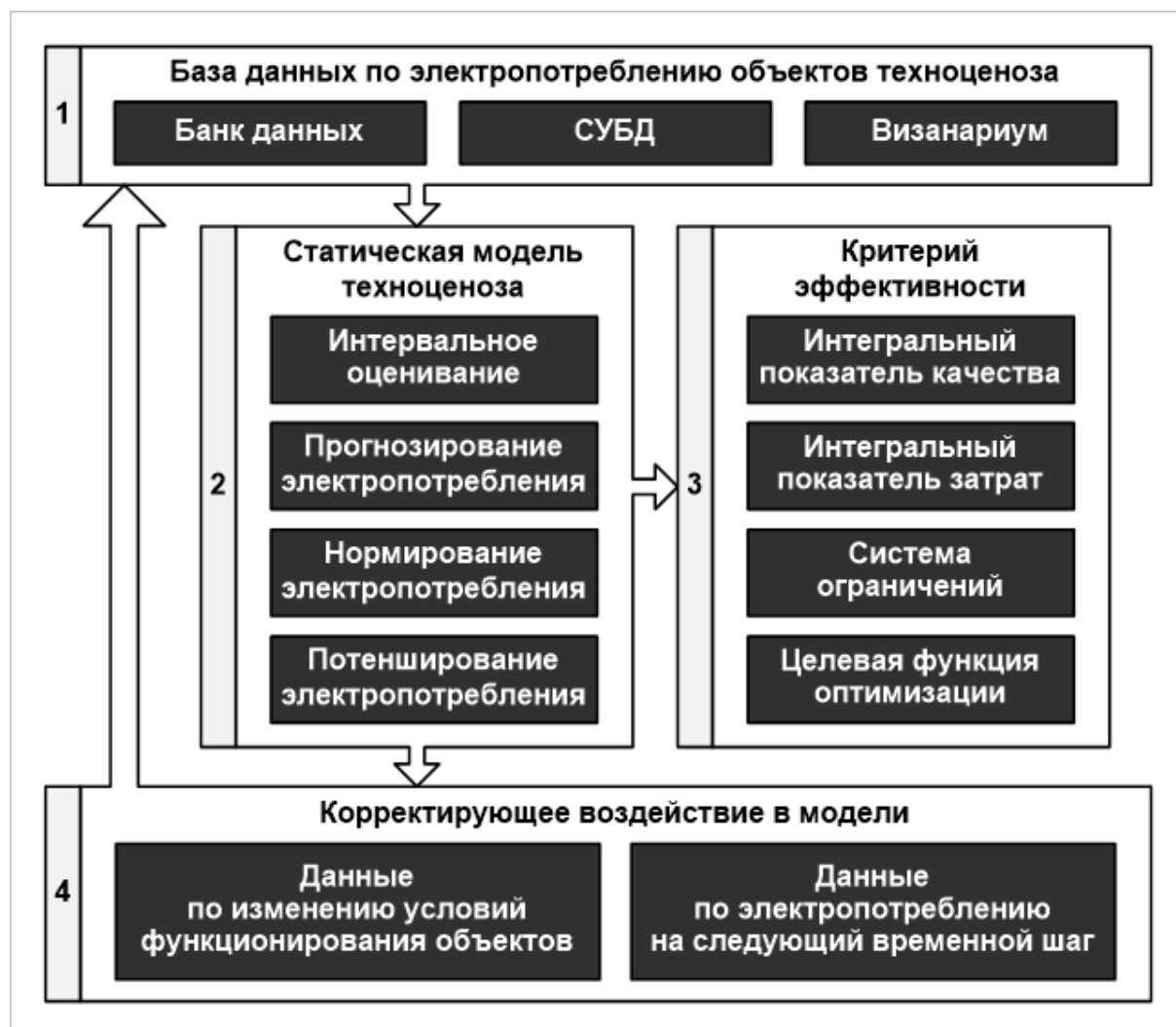


Рис. 4. Динамическая модель электропотребления техноценоза

Проблема развития динамической адаптивной модели электропотребления за счет ее дополнения внешними управляющими воздействиями породила новое теоретическое направление, основным содержанием которого являлось исследование процессов электропотребления техноценозов на так называемых бифуркационных этапах (рис. 5). Введение и обоснование принципиально нового понятия бифуркации по электропотреблению позволило дополнить теорию оптимального управления электропотреблением процедурами потенцирования на основе  $Z3$ -потенциала энергосбережения, потенцирования с учетом номенклатурных ограничений, МС-прогнозирования, режимного нормирования и ДС-анализа, а математический аппарат рангового анализа новым понятием трансформированного рангового параметрического распределения. В прикладном плане новый

подход к методологии оптимального управления электропотреблением техноценозов породил весьма широкие перспективы по созданию специализированных программно-аппаратных комплексов, которые находят применение, как в региональных энергосетевых, энергосервисных и энерго-сбытовых компаниях, так и в электротехнических комплексах регионов, муниципальных образований, предприятий и организаций [83,108].



Рис. 5. Бифуркационная модель электропотребления техноценоза

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). Аналитически ранговое параметрическое распределение по электропотреблению представляет собой числовую функцию, определенную на множестве ран-

говой топологической меры, полученную в результате аппроксимации отранжированного множества значений электропотребления объектов (как правило, приемников или потребителей) техноценоза [83,108]:

$$[\{W_k\}_{k=1}^n \xrightarrow{f:W \rightarrow R} \{R_k\}_{k=1}^n] \xrightarrow{\text{Approx}} W = f(x), \quad (17)$$

где  $\{W_k\}_{k=1}^n$  – множество значений электропотребления;  
 $\{R_k\}_{k=1}^n$  – множество топологических рангов;  
 $W(x)$  – функция рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению;  
 $x$  – ранговая топологическая мера.

Процедуре ранжирования предшествуют загрузка, очистка, форматирование и верификация данных. Следовательно, можем записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_k^{\text{raw}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Verific}} \{W_k^{\text{ver}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{ver}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Rangin}} \{W_k^{\text{ran}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{ran}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Approx}} \{W_k^{\text{app}}\}_{k=1}^n, \end{array} \right. \quad (18)$$

где  $\{W_k^{\text{raw}}\}_{k=1}^n$  – множество «сырых» значений электропотребления;  
 $\{W_k^{\text{ver}}\}_{k=1}^n$  – множество верифицированных значений;  
 $\{W_k^{\text{ran}}\}_{k=1}^n$  – множество отранжированных значений;  
 $\{W_k^{\text{app}}\}_{k=1}^n$  – множество аппроксимированных значений.

Из выражения (18) видно, что параметр электропотребления может быть одновременно описан четырьмя множествами, сформированными путем обработки следующих данных: 1) «сырых», загруженных непосредственно с приборов учета в базу; 2) верифицированных, полученных по результатам реализации применительно к «сырым» данным процедуры верификации; 3) отранжированных верифицированных данных; 4) аппроксимированных данных, полученных как ранговые проекции эмпирических верифицированных данных на аппроксимационном ранговом параметрическом распределении. Именно эти множества формируют четыре первичных слоя хранилища данных по электропотреблению техноценоза.

Здесь следует дать ряд определений. Под хранилищем данных по электропотреблению понимается предметно-ориентированная информационная база данных техноценоза, используемая для поддержки принятия

решений в рамках цифровой платформы энергоэффективности. Цифровая платформа энергоэффективности – интегрированная информационно-аналитическая система, реализующая применение параметрического цифрового двойника в управлении, что позволяет повысить качество на всех этапах процесса электропотребления. Однопараметрический цифровой двойник техноценоза – постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий наиболее актуальное хранилище данных по электропотреблению объектов техноценоза. Параметрическая виртуализация – способ создания цифрового двойника техноценоза, предполагающий формирование и обработку хранилища данных с использованием процедур рангового анализа. Рассмотрим подробнее состав хранилища данных (рис. 6).

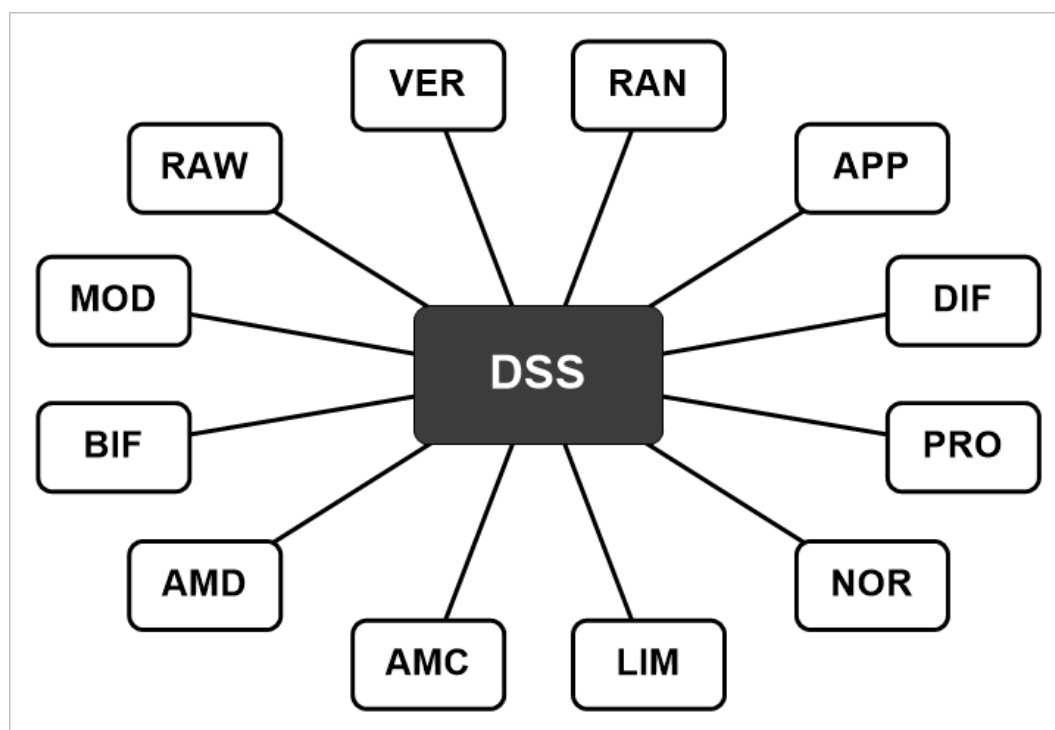


Рис. 6. Состав хранилища данных техноценоза

В него входят следующие основные слои данных (см. рис. 2 – 5): [RAW] – «сырые» данные, загруженные с приборов учета; [VER] – верифицированные данные, являющиеся результатом процедуры верификации слоя «сырых» данных; [RAN] – отранжированные верифицированные данные; [APP] – аппроксимированные данные, полученные как ранговые проекции эмпирических верифицированных данных на аппроксимационном ранговом параметрическом распределении; [DIF] – дифлекс-параметры как результат применения процедур интервального оценивания и дифлекс-анализа применительно к одному из первых четырех слоев; [PRO] – инерционный прогноз – как результат прогнозирования и GZ-анализа; [NOR] – нормы электропотребления – как результат нормирования и ASR-анализа;

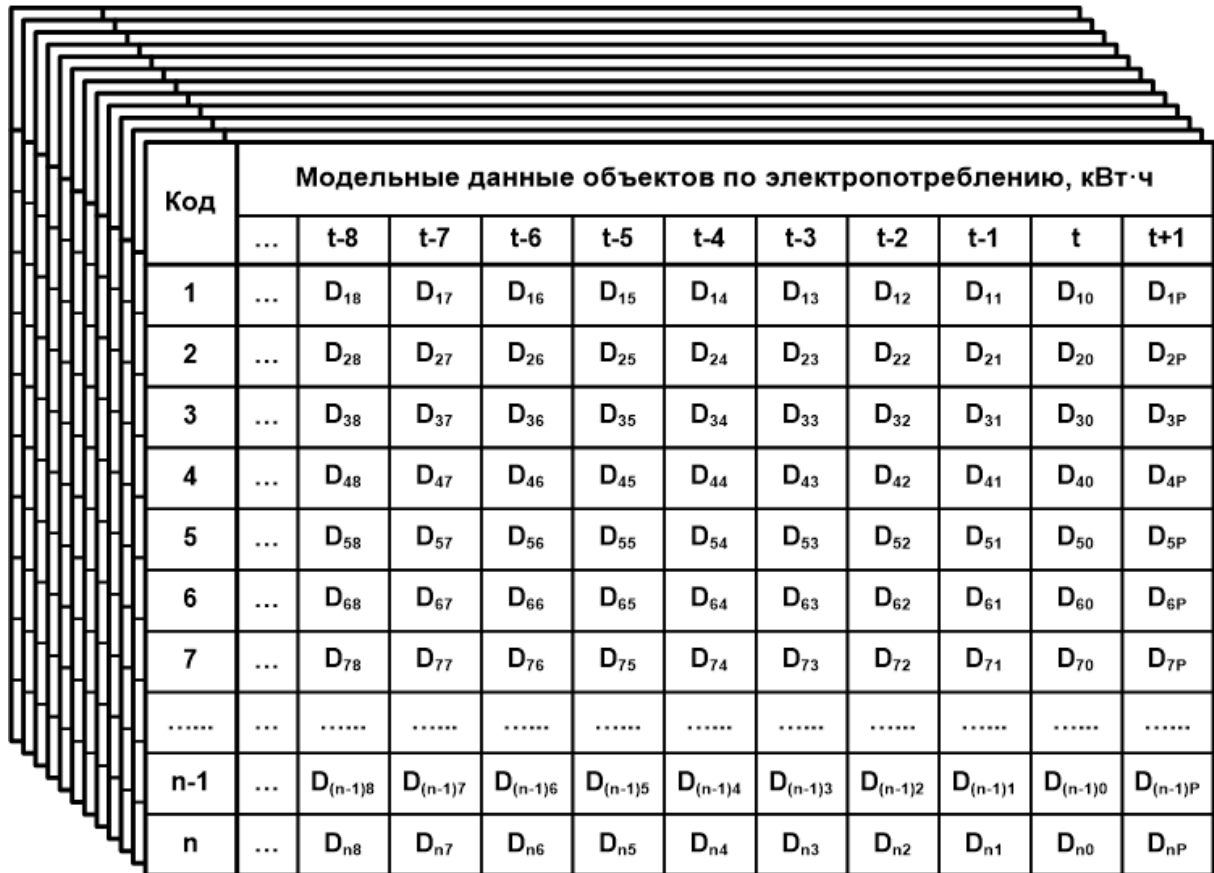
[LIM] – лимиты электропотребления – как результат процедуры потенцирования и ZP-анализа; [AMC] – добавочный ресурс MC-ценоза – как результат MC-прогнозирования; [AMD] – добавочный ресурс DC-ценоза – как результат DC-анализа; [BIF] – добавочный ресурс бифуркации – как результат анализа бифуркаций; [MOD] – модельные данные – как результат выпуклого анализа и моделирования на среднесрочную перспективу.

Первые четыре слоя данных (RAW, VER, RAN, APP) являются первичными и выполняют функции загрузки, очистки, восполнения и статистической обработки данных по электропотреблению методами рангового анализа, что создает основы полной цифровой профилизации. Здесь обеспечивается надежное хранение биллинговых данных по электропотреблению, их очистка от грубых ошибок и восполнение утерянных данных. Осуществляется первичная обработка данных на основе рангового анализа, что позволяет сгладить незначимые статистические отклонения.

Постоянная реализация статической модели электропотребления применительно к цифровому профилю пополняет хранилище данных информацией об аномалиях, прогнозах, нормах и лимитах, которые формируют вторичные слои данных первой очереди (DIF, PRO, NOR, LIM). Здесь производится фиксация объектов с аномальным электропотреблением, прогнозирование на основе инерционного сценария развития, фиксация диапазона нормального электропотребления, а также закладываются основы лимитирования объектов при осуществлении энергосбережения.

Реализация применительно к цифровому профилю динамической и бифуркационной моделей, пополняет хранилище данных информацией о вероятном состоянии техноценоза в будущем, при этом формируются вторичные слои данных второй очереди (AMC, AMD, BIF, MOD). Это позволяет постоянно осуществлять корректный учет внешнего воздействия, как со стороны вышестоящей системы управления, так и со стороны региональной энергосистемы. Учитываются результаты прогнозирования на основе бифуркационного сценария развития, а также среднесрочного моделирования на основе вероятных сценариев развития техноценоза.

На основе особым образом организованного хранилища данных может быть сформирован OLAP-куб – многомерный, долговременно хранимый массив данных техноценоза по электропотреблению, используемый в процессе интерактивного анализа энергоэффективности (рис. 7). Подобный инструмент может быть реализован на основе универсальных реляционных СУБД или в рамках специализированного программного обеспечения. Индексам массива соответствуют измерения или оси куба, а значениям элементов массива – так называемые, меры куба. В отличие от обычного массива в языках программирования, доступ к элементам OLAP-куба может осуществляться как по полному набору индексов (измерений), так и по их подмножеству. При этом результатом будет не один элемент, а их множество, являющееся аргументом агрегирующей функции.



Код	Модельные данные объектов по электропотреблению, кВт·ч										
	...	t-8	t-7	t-6	t-5	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1
1	...	D <sub>18</sub>	D <sub>17</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>14</sub>	D <sub>13</sub>	D <sub>12</sub>	D <sub>11</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>1P</sub>
2	...	D <sub>28</sub>	D <sub>27</sub>	D <sub>26</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>24</sub>	D <sub>23</sub>	D <sub>22</sub>	D <sub>21</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>2P</sub>
3	...	D <sub>38</sub>	D <sub>37</sub>	D <sub>36</sub>	D <sub>35</sub>	D <sub>34</sub>	D <sub>33</sub>	D <sub>32</sub>	D <sub>31</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>3P</sub>
4	...	D <sub>48</sub>	D <sub>47</sub>	D <sub>46</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>44</sub>	D <sub>43</sub>	D <sub>42</sub>	D <sub>41</sub>	D <sub>40</sub>	D <sub>4P</sub>
5	...	D <sub>58</sub>	D <sub>57</sub>	D <sub>56</sub>	D <sub>55</sub>	D <sub>54</sub>	D <sub>53</sub>	D <sub>52</sub>	D <sub>51</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>5P</sub>
6	...	D <sub>68</sub>	D <sub>67</sub>	D <sub>66</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>64</sub>	D <sub>63</sub>	D <sub>62</sub>	D <sub>61</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>6P</sub>
7	...	D <sub>78</sub>	D <sub>77</sub>	D <sub>76</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>74</sub>	D <sub>73</sub>	D <sub>72</sub>	D <sub>71</sub>	D <sub>70</sub>	D <sub>7P</sub>
.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
n-1	...	D <sub>(n-1)8</sub>	D <sub>(n-1)7</sub>	D <sub>(n-1)6</sub>	D <sub>(n-1)5</sub>	D <sub>(n-1)4</sub>	D <sub>(n-1)3</sub>	D <sub>(n-1)2</sub>	D <sub>(n-1)1</sub>	D <sub>(n-1)0</sub>	D <sub>(n-1)P</sub>
n	...	D <sub>n8</sub>	D <sub>n7</sub>	D <sub>n6</sub>	D <sub>n5</sub>	D <sub>n4</sub>	D <sub>n3</sub>	D <sub>n2</sub>	D <sub>n1</sub>	D <sub>n0</sub>	D <sub>nP</sub>

Рис. 7. OLAP-куб данных по электропотреблению

Ниже представлена матрица OLAP-куба данных по электропотреблению, в которой показаны его состав, а также измерения (оси).

$$[\text{OLAP}]_{kt}^p = \begin{bmatrix} [\text{RAW}]_{kt} & [\text{DIF}]_{kt} & [\text{AMC}]_{kt} \\ [\text{VER}]_{kt} & [\text{PRO}]_{kt} & [\text{AMD}]_{kt} \\ [\text{RAN}]_{kt} & [\text{NOR}]_{kt} & [\text{BIF}]_{kt} \\ [\text{APP}]_{kt} & [\text{LIM}]_{kt} & [\text{MOD}]_{kt} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где k – код объекта техноценоза;  
 t – шаг модельного времени;  
 p – идентификатор двумерного массива данных куба.

Кубирование данных, помимо формирования хранилища данных по электропотреблению, предполагает создание и постоянную реализацию, так называемых, агрегаторов данных. Ниже представлены первичные агрегаторы, осуществляющие взаимодействие между первичными и вторичными (первой и второй очереди) слоями хранилища данных.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 W : \{[RAW],[VER],[RAN]\} \rightarrow [APP]; \\
 W : \{[VER],[RAN],[APP]\} \rightarrow [DIF]; \\
 W : \{[VER],[RAN],[APP]\} \rightarrow [PRO]; \\
 W : \{[VER],[RAN],[APP]\} \rightarrow [NOR]; \\
 W : \{[VER],[DIF],[PRO]\} \rightarrow [LIM]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[PRO]\} \rightarrow [AMC]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[PRO]\} \rightarrow [AMD]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[PRO]\} \rightarrow [BIF].
 \end{array} \right. \quad (20)$$

На основе первичных агрегаторов формируются и постоянно реализуются вторичные агрегаторы, которые позволяют пополнить OLAP-куб данных по электропотреблению дополнительными слоями.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 W : \{[APP],[DIF],[PRO]\} \rightarrow [POT]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[POT]\} \rightarrow [IPK]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[POT]\} \rightarrow [IPZ]; \\
 W : \{[APP],[IPK],[IPZ]\} \rightarrow [IPE]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[IPE]\} \rightarrow [DFU]; \\
 W : \{[APP],[DIF],[IPE]\} \rightarrow [DAM]; \\
 W : \{[APP],[IPE],[DAM]\} \rightarrow [PLN]; \\
 W : \{[DFU],[DAM],[PLN]\} \rightarrow [MOD],
 \end{array} \right. \quad (21)$$

где [POT] – потенциалы энергосбережения объектов;  
 [IPK] – интегральные показатели качества;  
 [IPZ] – интегральные показатели затрат;  
 [IPE] – интегральные показатели эффективности;  
 [DFU] – дифлекс-углы объектов техноценоза;  
 [DAM] – дамадж-параметры объектов техноценоза;  
 [PLN] – показатели конверсии объектов.

Из выражений (19) – (21) видно, что динамическая оценка количественно-качественных показателей электропотребления может быть осуществлена только на основе параметрического кубирования данных.

Итак, параметрическая виртуализация, предполагающая формирование и обработку хранилища данных с использованием процедур рангового анализа техноценоза по электропотреблению, позволяет создать его однопараметрический цифровой двойник как постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий наиболее актуальные данные по электропотреблению объектов. Это позволяет: 1) надежно хранить данные по электропотреблению, снятые с приборов учета, осуществлять их очистку, форматирование, верификацию, сглаживание и первичную статистическую обработку; 2) осуществлять постоянный учет системности данных, комплексную оценку влияния техноценоза на объекты и объектов на техноценоз, а также расчет параметров внешних управляющих воздействий; 3) выполнять динамическую корректную оценку количественно-качественных показателей электропотребления, расчет неизбежного ущерба техноценозу от неэффективного расходования электроэнергии объектами; 4) обеспечивать получение полной информации о потенциале энергосбережения как техноценоза, так и каждого из его объектов, мониторинг показателей эффективности и выбор эффективной стратегии управления (рис. 8).

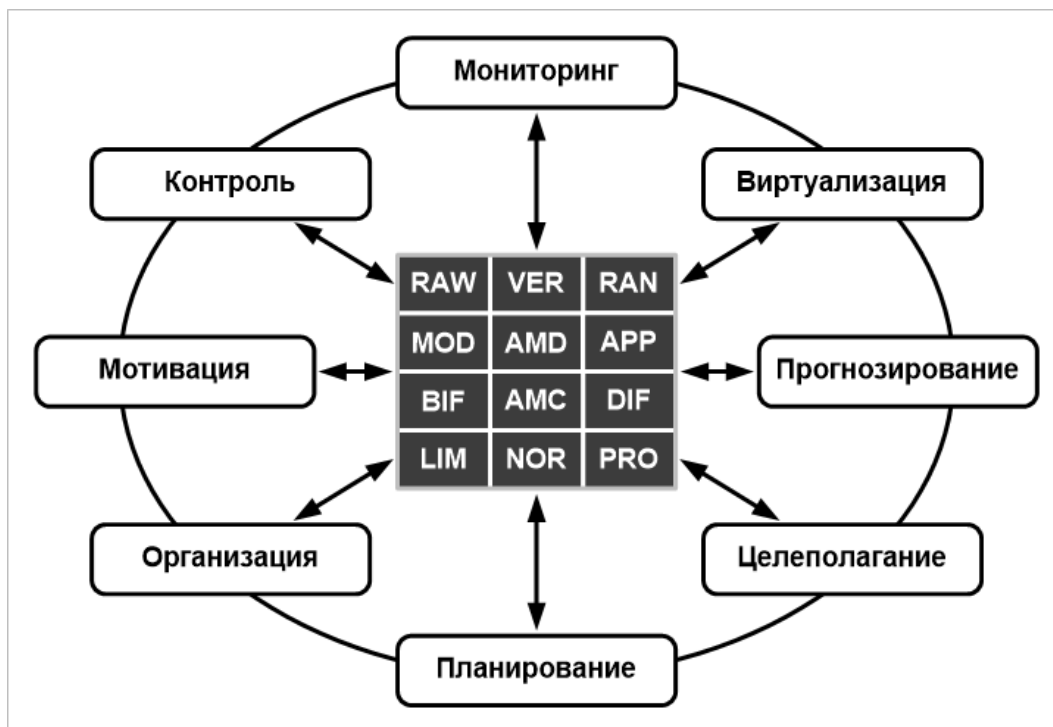


Рис. 8. Параметрический цифровой двойник в управлении

Вспомним, что электропотребление – управляемый (дифлексируемый, прогнозируемый, нормируемый и потенцируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками или потребителями, осуществляемый автономно либо в составе техноценоза с целью обеспечения электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества с предельно воз-

можной экономией электроэнергии и минимизацией затрат. Если взглянуть на цикл управления в техноценозах (рис. 8), то можно заключить, что применение параметрического цифрового двойника в управлении электропотреблением объектов техноценоза позволит существенно повысить качество на всех этапах процесса и, тем самым, создаст предпосылки для разработки новой цифровой платформы энергоэффективности.

Важной функцией цифровой платформы энергоэффективности является параметрическая адаптация – непрерывная проверка данных по электропотреблению по критерию максимума прогностических возможностей с целью выбора опорного слоя и корректировки (рис. 9 и 10).

Ранг	Электропотребление объектов по временным интервалам, кВт·ч										
	...	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	...		$W_{27}$	$W_{26}$	$W_{25}$	$W_{24}$	$W_{23}$	$W_{22}$	$W_{21}$	$W_{20}$	?
3	...	$W_{38}$		$W_{36}$	$W_{35}$	$W_{34}$	$W_{33}$	$W_{32}$	$W_{31}$	$W_{30}$	?
4	...	$W_{48}$	$W_{47}$		$W_{45}$	$W_{44}$	$W_{43}$	$W_{42}$	$W_{41}$	$W_{40}$	?
5	...	$W_{58}$	$W_{57}$	$W_{56}$		$W_{54}$	$W_{53}$	$W_{52}$	$W_{51}$	$W_{50}$	?
6	...	$W_{68}$	$W_{67}$	$W_{66}$	$W_{65}$		$W_{63}$	$W_{62}$	$W_{61}$	$W_{60}$	?
7	...	$W_{78}$	$W_{77}$	$W_{76}$	$W_{75}$	$W_{74}$		$W_{72}$	$W_{71}$	$W_{70}$	?
.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
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	...	$W_{n8}$	$W_{n7}$	$W_{n6}$	$W_{n5}$	$W_{n4}$	$W_{n3}$	$W_{n2}$	$W_{n1}$	$W_{n0}$	?

Вектор верификации

Вектор моделирования

Матрица предыдущих данных

Рис. 9. Информационные подсистемы параметрической адаптации данных по электропотреблению

Замысел параметрической адаптации заключается в следующем. Прежде всего, вспомним, что первые четыре слоя данных (RAW, VER, RAN, APP) являются первичными и выступают в качестве информационной основы для последующей реализации процедур рангового анализа с целью получения восьми вторичных слоев. Однако остается открытым вопрос, а какой именно из первичных слоев в данном случае следует выбрать. Предлагается осуществлять их предварительную верификацию по критерию максимума прогностических возможностей (рис. 10).

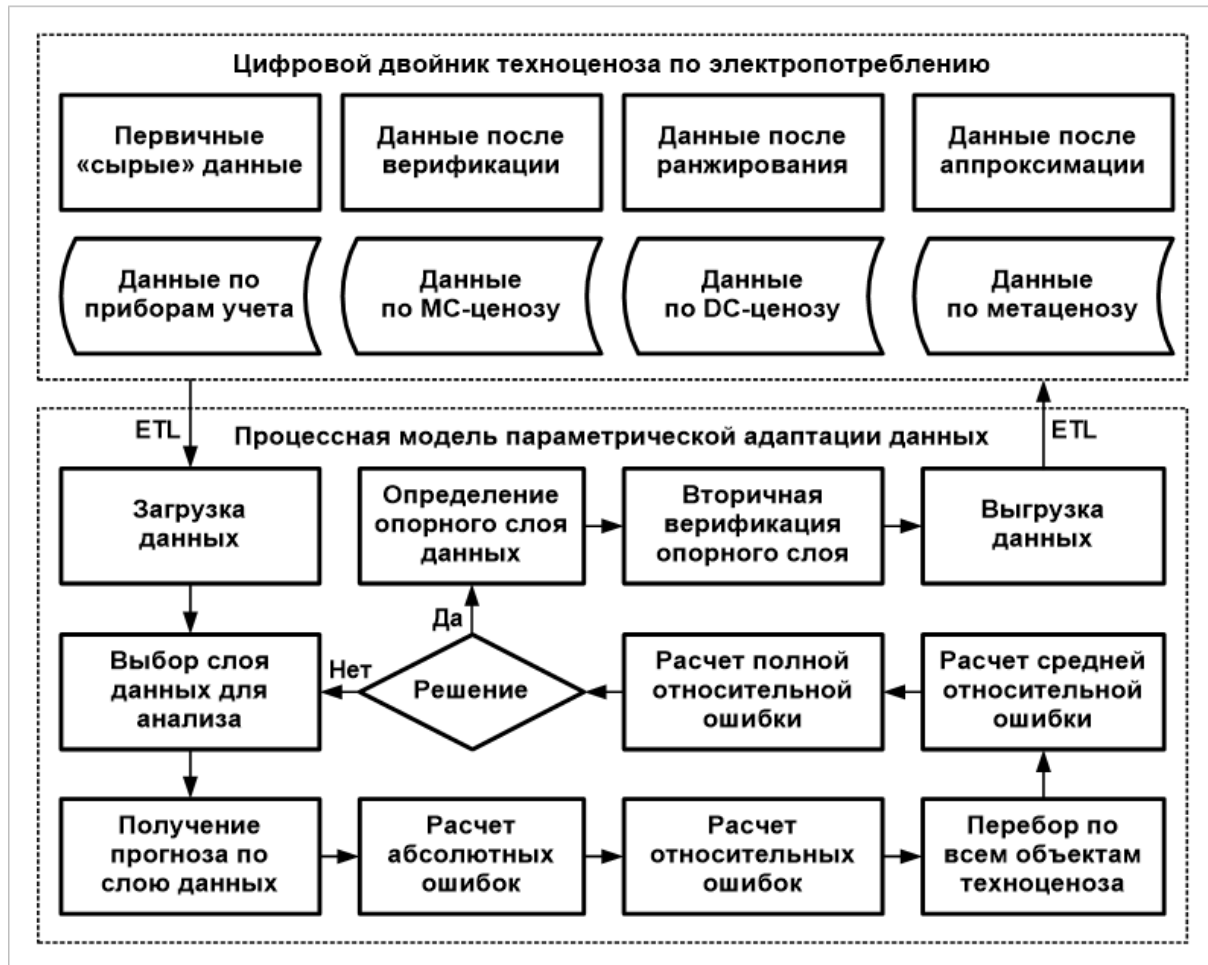


Рис. 10. Концептуальная модель параметрической адаптации данных

Процессная модель параметрической адаптации данных реализуется следующим образом. После загрузки данных осуществляется выбор очередного слоя, который делится на три информационных подсистемы: матрицы данных, вектора верификации (последнего известного вектора данных), а также вектора прогнозирования (рис. 9). На основе матрицы данных осуществляется прогнозирование на вектор верификации, а полученный прогноз сравнивается по критерию точности с самим вектором верификации рассматриваемого слоя. В качестве показателей точности рассматриваются абсолютные и относительные (средние и полные) ошибки, рассчитываемые по методике, изложенной в параграфе 4.4. Там же изложены и рекомендации по принятию решения относительно спорных случаев (когда отдельные показатели точности дают результаты «вразнобой» и общий вывод становится неочевидным). После того как циклично будут рассчитаны показатели точности для каждого из четырех первичных слоев, производится выбор слоя данных, на котором наблюдается наивысшая точность прогнозирования. Он и рассматривается на данном временном

интервале в качестве опорного, который будет в дальнейшем использоваться в качестве исходного для реализации процедур рангового анализа с целью получения вторичных слоев данных по электропотреблению.

Итак, цифровая платформа энергоэффективности реализует применение параметрического цифрового двойника в управлении, что позволяет повысить качество на всех этапах процесса электропотребления. При этом выполняется алгоритм, показанный ниже на рисунке 11.



Рис. 11. Концептуальная модель цифровой платформы

Процессная модель управления электропотреблением в рамках цифровой платформы реализуется следующим образом. После загрузки данных осуществляется анализ стратегии энергосбережения. Затем применительно к опорному слою данных производятся процедуры интервального оценивания, дифлекс-анализа, потенцирования и ZP-анализа (рис. 12). Далее осуществляется процедура ZP-планирования, которая завершается мониторингом конверсии и расчетом показателей эффективности. После этого, на основе информации о соответствии показателей эффективности стратегическим требованиям, принимается решение. Если показатели не

удовлетворяют требованиям, то осуществляется возврат к этапу планирования мероприятий, изменяются показатели ZP-плана и цикл повторяется. В случае если будет отмечено соответствие показателей эффективности, производится переход к процедурам прогнозирования (GZ-анализа) и нормирования (ASR-анализа). Завершаются расчеты моделированием с учетом информации о MC- и DC-ценах, а также бифуркационных процессах.

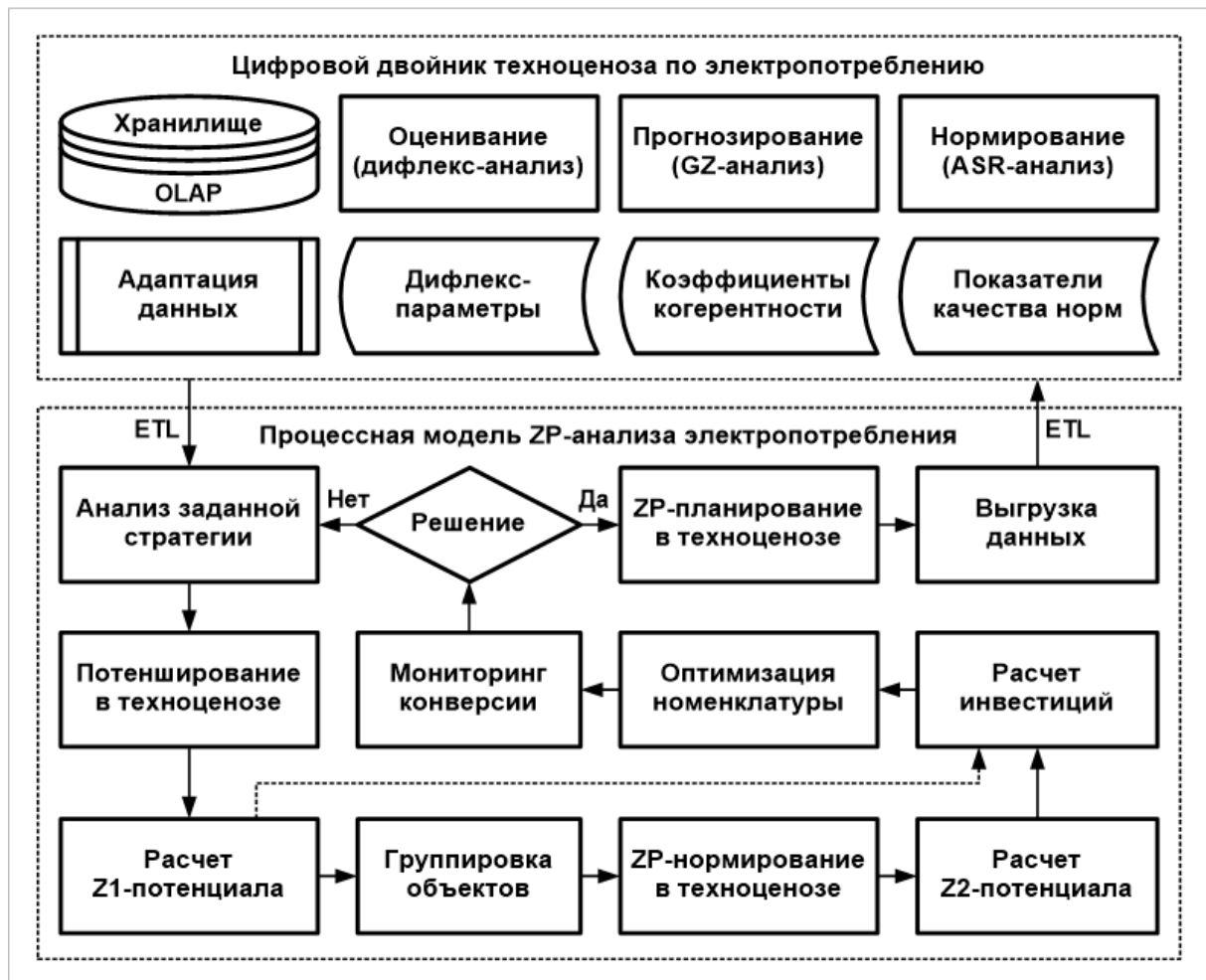


Рис. 12. Концептуальная модель подсистемы ZP-анализа

Центральное место в процессной модели управления электропотреблением занимает подсистема ZP-анализа (рис. 12). Рассмотрим ее подробнее. Процессная модель ZP-анализа в рамках управления электропотреблением реализуется следующим образом. После загрузки данных и анализа заданной стратегии энергосбережения осуществляется потенцирование, которое завершается расчетом Z1-потенциала энергосбережения. Далее производится группировка объектов по функциональным группам, ZP-нормирование и расчет Z2-потенциала энергосбережения. Затем рассчитываются инвестиции, производится оптимизация номенклатуры приемников электроэнергии и мониторинг конверсии. Оценивается степень соответ-

ствия уровня электропотребления плановым показателем. В случае соответствия осуществляется ZP-планирование в техноценозе и производится выгрузка данных. В противном случае осуществляется возврат к этапу анализа стратегии и расчеты циклично повторяются.

На рисунке 13 представлена реляционная модель цифровой платформы. Это логическая схема, отражающая ключевые отношения, связи между ними, целостность, а также процессы преобразования данных. Основное внимание здесь уделено функциональным связям между слоями данных, агрегаторами и процессами преобразования.

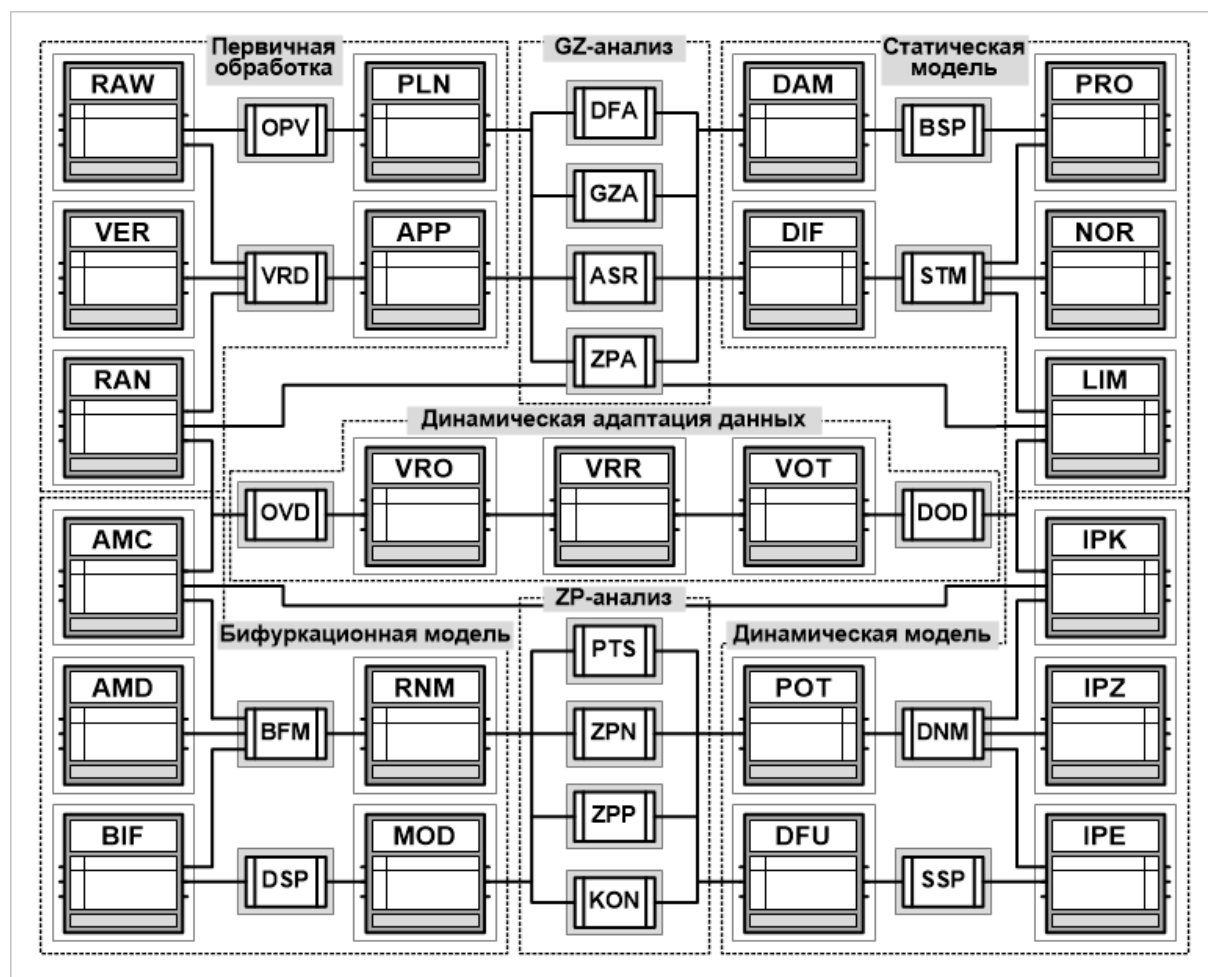


Рис. 13. Реляционная модель цифровой платформы

Реляционная модель цифровой платформы обеспечивает пять потоков данных: очистки и абстрагирования, инерционной, динамической и бифуркационной обработки, а также обратной адаптации. Поток очистки и абстрагирования реализуется в основном в рамках модуля первичной обработки и включает в себя первичные слои «сырых», верифицированных, отранжированных, а также аппроксимированных данных (RAW, VER, RAN, APP). Здесь же находится классификатор используемых приемников

электроэнергии (PLN) и два преобразователя: организатор (OPV) и верификатор (VRD). Поток очистки и агрегирования данных сообщается с потоком инерционной обработки данных посредством модуля GZ-анализа, включающего в себя четыре преобразователя: DF-анализатор (DFA), GZ-анализатор (GZA), ASR-анализатор (ASR) и ZP-анализатор (ZPA).

Поток инерционной обработки данных в основном реализуется в рамках модуля статической модели, в который входят пять вторичных слоев первой очереди агрегирования: дифлекс-параметров (DIF), инерционных прогнозов (PRO), норм (NOR) и лимитов (LIM). Здесь же имеются один вторичный слой второй очереди агрегирования: дамадж-параметров (DAM) и два преобразователя: диффлектор (STM) и дамагатор (BSP).

Поток динамической обработки данных реализуется в рамках модуля динамической модели, в который входят три вторичных слоя второй очереди агрегирования: интегральных показателей качества (IPK), интегральных показателей затрат (IPZ), а также интегральных показателей эффективности (IPE). Здесь же находятся вторичный слой третьей очереди агрегирования: дифлекс-углов (DFU), а также классификатор тарифов на электроэнергию (POT) и два преобразователя: лоссер (DNM), эффектор (SSP). Поток динамической обработки данных сообщается с потоком бифуркационной обработки данных посредством модуля ZP-анализа, включающего в себя четыре преобразователя: потенциатор (PTS), ZP-анализатор (ZPN), ZP-планировщик (ZPP), а также конвертор (KON).

Поток бифуркационной обработки данных реализуется в рамках модуля бифуркационной модели, в который входят четыре вторичных слоя второй очереди агрегирования: добавочного ресурса MC-ценоза (AMC), добавочного ресурса DC-ценоза (AMD), добавочного ресурса бифуркации (BIF), а также модельных данных (MOD). Здесь же имеются вторичный слой третьей очереди агрегирования: суммарного добавочного ресурса (RNM) и два преобразователя: имитатор (DSP) и бифуркатор (BFM).

Поток обратной адаптации данных реализуется в рамках модуля динамической адаптации данных, в который входят три вторичных слоя второй очереди агрегирования: абсолютных ошибок прогнозирования (VRO), относительных ошибок (VRR) и средних ошибок (VOT). Здесь же находятся два преобразователя: рецептор (OVD) и ретернер (DOD).

Мы рассмотрели концепцию цифровой платформы энергоэффективности, которая предусматривает применение цифрового двойника в управлении техноценозом. Однако предлагаемая платформа не решает все вопросы цифровизации процесса «электроснабжение – электропотребление», если ее рассматривать как переход техноценоза на новые модели бизнес-процессов, основанных на информационных технологиях. Наглядно место нашей цифровой платформы можно показать, если рассмотреть схему паттерна VSM Cenose (рис. 14). Паттерн VSM Cenose – шаблон самовоспроизводящейся организации ценологического типа с VSM-подобной систе-

мой управления, который единообразно моделирует инвариантные, ресурсные и структурные свойства организации (техноценоза) [83]. Параметрический цифровой двойник по электропотреблению рассматривается как ресурсная подсистема паттерна VSM Cenose, отражающая взаимодействие техноценоза с региональным электроэнергетическим комплексом лишь по отдельному параметру дифференциального электропотребления.

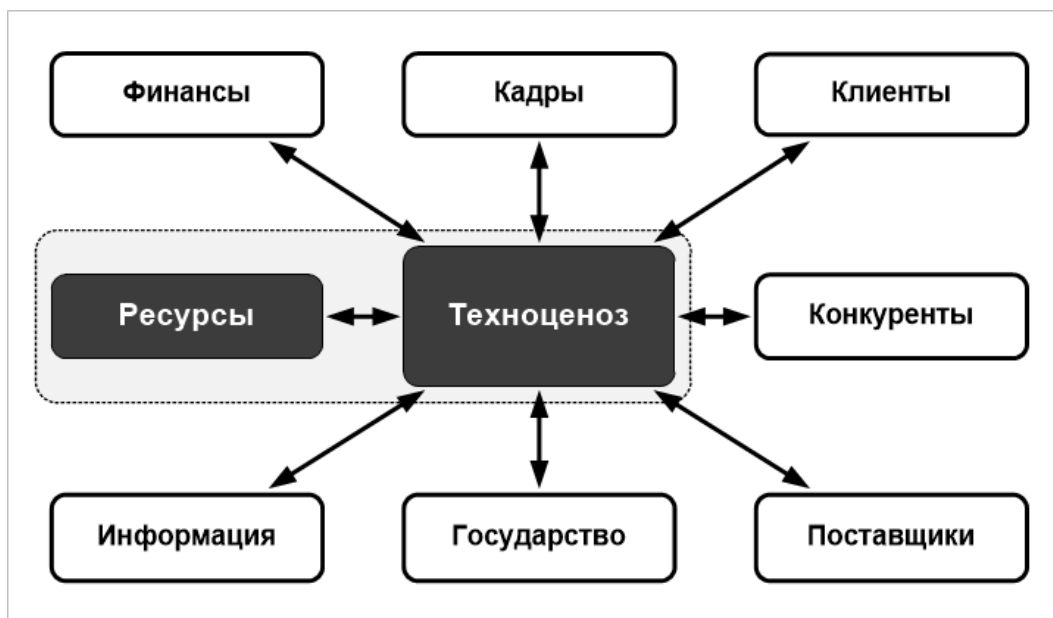


Рис. 14. Параметрический цифровой двойник в паттерне VSM Cenose

Таким образом, цифровая платформа энергоэффективности представляет собой интегрированную информационно-аналитическую систему, реализующую применение параметрического цифрового двойника техноценоза в управлении электропотреблением. Платформа обеспечивает пять потоков данных: очистки и абстрагирования, инерционной, динамической и бифуркационной обработки, а также обратной адаптации, что позволяет повысить качество управления на всех этапах процесса электропотребления. Однопараметрический цифровой двойник техноценоза – постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий наиболее актуальное хранилище данных по электропотреблению объектов техноценоза. При этом в качестве способа создания цифрового двойника техноценоза выступает параметрическая виртуализация, предполагающая формирование и обработку хранилища данных по электропотреблению с использованием процедур рангового анализа. Под хранилищем данных по электропотреблению понимается предметно-ориентированная информационная база данных, организованная в виде OLAP-куба и используемая для поддержки принятия решений в рамках цифровой платформы энергоэффективности.

[\[На следующую страницу\]](#)