Нашей малышке Ноя, которая только начинает
свой жизненный путь, посвящается

В.И. Гнатюк

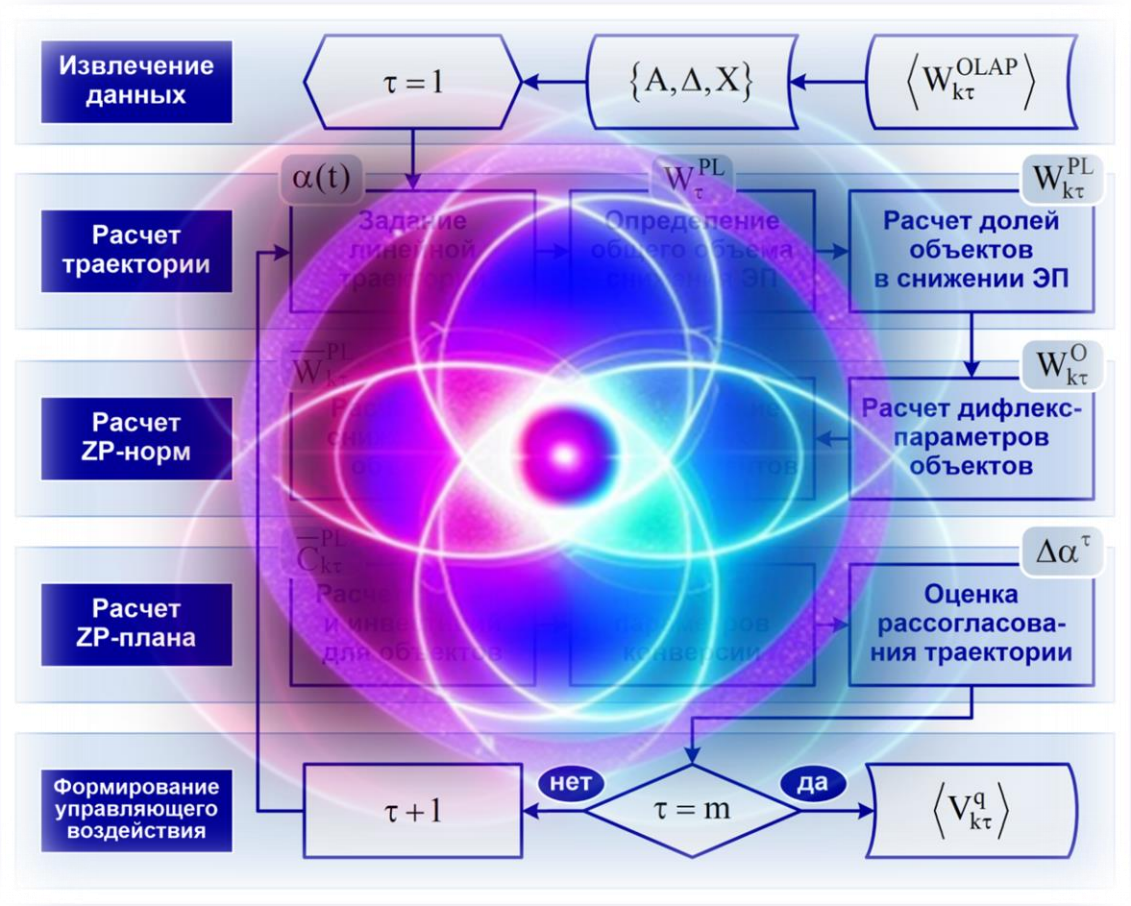
КВАНТОВЫЙ РАНГОВЫЙ АНАЛИЗ
В УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ТЕХНОЦЕНОЗА

Трактат

Введение · Электропотребление в техноценозе · Идентификация объекта управления · Постановка задачи управления · Квантовая ранговая динамика · Общие аспекты управления в техноценозе Управление электропотреблением объектов техноценоза · Алгоритм управления электропотреблением · Заключение · Список литературы

© Гнатюк, В.И. Квантовый ранговый анализ в управлении электропотреблением техноценоза [Трактат] / В.И. Гнатюк Электронные текстовые данные. – Калининград: [б.и.], [2023] Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/kvarandin.pdf

Если ты управляешь системой и результат управления всегда такой, как ты ожидаешь, значит, не ты управляешь, а система управляет тобой



Аннотация

Объектом наших исследований является региональный электротехнический комплекс, для изучения которого применяется универсальная модель техноценоза. 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 имеющимся критерием 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 разработанным дифлекс-функционалам позволяет оценить параметрическую динамику техноценоза с учетом нового критерия на заданном горизонте. Фиксация объектов на ранговом гиперпараметрическом распределении может быть успешно осуществлена в рамках квантовой ранговой динамики с помощью понятий дифлекс-функции и волновой функции. Процесс управления электропотреблением объектов техноценоза предлагается осуществлять на основе алгоритма, основанного на постоянно корректируемой линейной траектории изменения дифлекс-угла во времени.

© В.И. Гнатюк, 2023, http://www.gnatukvi.ru, mail@gnatukvi.ru

The object of our research is the regional electrical engineering complex, for the study of which the universal model of technocenosis is used. Operating in the rank analysis of technocenoses with hyperparametric surfaces and hyperparametric distributions provides a number of significant advantages. First of all, this creates the possibility of a comprehensive assessment of the process of power consumption both from a quantitative and qualitative point of view. So, in accordance with the existing criterion, the process of technocenosis power consumption, minimizing the integral difflex parameter while maximizing the difflex angle, can be considered the best from a quantitative and qualitative point of view. The implementation of forecasting procedures in relation to the developed difflex functionals makes it possible to evaluate the parametric dynamics of the technocenosis, taking into account the new criterion on a given horizon. Fixing objects on a rank hyperparametric distribution can be successfully implemented within the framework of quantum rank dynamics using the concepts of difflex function and wave function. The process of controlling the power consumption of technocenosis is proposed to be carried out on the basis of an algorithm based on a constantly corrected linear trajectory of the difflex angle change in time.

© Victor I. Gnatyuk, 2023, http://www.gnatukvi.ru, mail@gnatukvi.ru

Введение

Объектом нашего исследования выступает СЭТ-система – социально-экономико-техническая система – в различных концепциях: социально-экономическая система; организационно-техническая система; технико-экономическая система. Ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная и взаимодействующая посредством слабых связей совокупность технических объектов (пространственно-технологических кластеров, человеко-машинных комплексов, зданий и сооружений, технических изделий, средств и персонала, обеспечивающего жизненный цикл), социальных и экономических субъектов (институтов, выполняющих функции распределения и потребления материальных и нематериальных ресурсов, производства, распределения, обмена и потребления товаров и услуг), а также финансов (финансовых средств, ресурсов и финансовых инструментов).

При исследовании СЭТ-систем всегда имеют дело с фракталоподобной дисконтинуальной средой, а также статистическими выборками данных, на которых не работает аксиоматика закона больших чисел и центральных предельных теорем. При рассмотрении СЭТ-системы как организационно-технической системы находит применение универсальная абстрактная модель – техноценоз – ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная совокупность технических изделий и пространственно-технологических кластеров, объединенных слабыми информационными и технологическими связями. Связи в техноценозе носят особый характер, определяемый конструктивной и технологической независимостью технических изделий и многообразием решаемых задач. Взаимосвязанность техноценоза определяется единством конечной цели функционирования, достигаемой с помощью общих систем управления и всестороннего обеспечения. Оптимальное управление техноценозом является особой процедурой и реализуется в рамках методологии рангового анализа.

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. Второй раздел – комбинаторный ранговый анализ – основан на свойствах, отношениях, а также закономерностях ранговых конфигураций и структур. Важным инструментом третьего раздела – векторного рангового анализа – выступает векторная мера параметрической близости в ранговом параметрическом пространстве. Включает стандартные процедуры параметрического нормирования, интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенширования. Более глубокий анализ рангового параметрического распределения техноценоза позволяет существенно повысить эффективность

рангового анализа. Он осуществляется в рамках следующих (так называемых «тонких») процедур: дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования), ASR-анализа (на этапе нормирования), а также ZP-анализа (на этапе потенширования).

Характерным примером техноценоза 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 управления электропотреблением. Управление электропотреблением техноценоза – обязательное для исполнения систематическое организационно-техническое воздействие на объекты со стороны системы управления посредством взаимосвязанных процедур интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенширования. Реализуется в рамках процедуры ZP-анализа – осуществляемой на этапе потенширования тонкой процедуры управления электропотреблением, имеющей целью разработку ZP-плана энергосбережения в техноценозе и состоящей из этапов ZP-нормирования, ZP-планирования, а также мониторинга конверсии. В основе ZP-анализа лежит методика оценки Z-потенциала энергосбережения. Конечной целью ZP-анализа является разработка ZP-плана – документа, разрабатываемого по результатам ZP-планирования индивидуально для каждого объекта техноценоза на расчетный промежуток времени и предполагающего, что электропотребление техноценоза в целом должно понизиться на величину, соответствующую Z-потенциалу энергосбережения.

Успех управления техноценозом обусловливается тремя аспектами: первый – идентификация объекта управления, второй – постановка задачи управления и третий – алгоритмизация управления. Ранее в рамках общей проблемы идентификации техноценоза как объекта управления нам удалось заложить основы однопараметрической цифровизации, что позволило, по сути, переосмыслить методологию преобразования данных в контуре управления техноценозом. Затем была создана теория ранговых гиперпараметрических распределений, благодаря которой стало возможным рассчитывать устойчивые во времени детерминированные инварианты и, тем самым, правильно фиксировать состояние техноценоза на различных стадиях управленческого процесса. Кроме того, в рамках ZP-анализа был создан критерий оптимального управления и достаточно детально отработан алгоритм выбора и реализации стратегий управления техноценозом с подробным описанием этапов ZP-нормирования и ZP-планирования, которые, будучи применены к объектам техноценоза, обеспечивали разработку ZP-плана, а также гарантированное достижение цели управления.

Если говорить о современном состоянии теории управления техноценозами, то наименее разработанной представляется область идентификации техноценоза как объекта управления. Остаются нерешенными ряд

ключевых задач, касающихся методологии определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений. Кроме того, недостаточно исследованы закономерности ранговой динамики в топологическом пространстве, что не позволяет считать решенной проблему моделирования положения точек, соответствующих объектам техноценоза на ранговых гиперпараметрических распределениях. И здесь для решения ряда наиболее сложных задач мы впервые делаем попытку заложить основы, так называемой, квантовой ранговой динамики.

Следует отметить, что очень многие из создателей классической квантовой теории неоднократно отмечали, что квантовые эффекты присущи не только микро-, но и макрообъектам. В подтверждение этого к настоящему времени создан целый ряд приложений квантовой теории в таких областях, как астрофизика, электроника, оптика, минералогия, информатика, биология, экономика, психология и др. Мы полагаем, что квантовая теория применима и в области ранговой динамики техноценозов. В частности, здесь наблюдается квантовый эффект и, как следствие, выполняется принцип неопределенности. Квантовый эффект в техноценозе проявляется в том, что скачкообразное перемещение объекта из одного ранга в другой становится возможным лишь когда его параметр изменяется на определенное значение, задаваемое формой рангового гиперпараметрического распределения техноценоза в данный момент времени и пропорциональное минимальному значению параметра (параметрическому «кванту»).

Принцип неопределенности заключается в следующем. Объект техноценоза находится в определенном ранге лишь с некоторой вероятностью. Другими словами, он в своем состоянии, как бы «размазан» в окрестности ранга. В то же время, ранговое гиперпараметрическое распределение фиксируется на ранговой гиперпараметрической поверхности под определенным дифлекс-углом тоже с определенной вероятностью («размазано» в окрестностях аппроксимационной кривой). Однако форма рангового гиперпараметрического распределения зависит от положения точек объектов в топологическом пространстве. Это приводит к тому, что в заданный момент времени невозможно одновременно точно определить координаты точки объекта в ранговом топологическом пространстве, с одной стороны, и координаты точки на ранговом гиперпараметрическом распределении, соответствующей данному объекту, с другой стороны.

Подтверждение наличия квантового эффекта и выполнения принципа неопределенности в техноценозе позволяет в области ранговой топологии применить математический аппарат квантовой теории и сформировать на этой основе теорию квантового рангового анализа. При этом наиболее сложные задачи определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений, а также фиксации объектов на них решаются в рамках квантовой ранговой динамики с помощью понятий альфа-функции, дифлекс-функции и волновой функции.

Электропотребление в техноценозе

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. Он выступает в качестве подсистемы регионального электроэнергетического комплекса (рис. 1) ([9]).

Рис. 1. Региональный электротехнический комплекс в составе регионального электроэнергетического комплекса

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 [9].

С целью теоретического обобщения в области ранговой топологии рассмотрим процедуры интервального оценивания и дифлекс-анализа, являющиеся частью статической модели электропотребления (рис. 2). Однако прежде обсудим еще один не менее важный аспект, касающийся понятий электроснабжения и электропотребления в техноценозе [2,4-11].

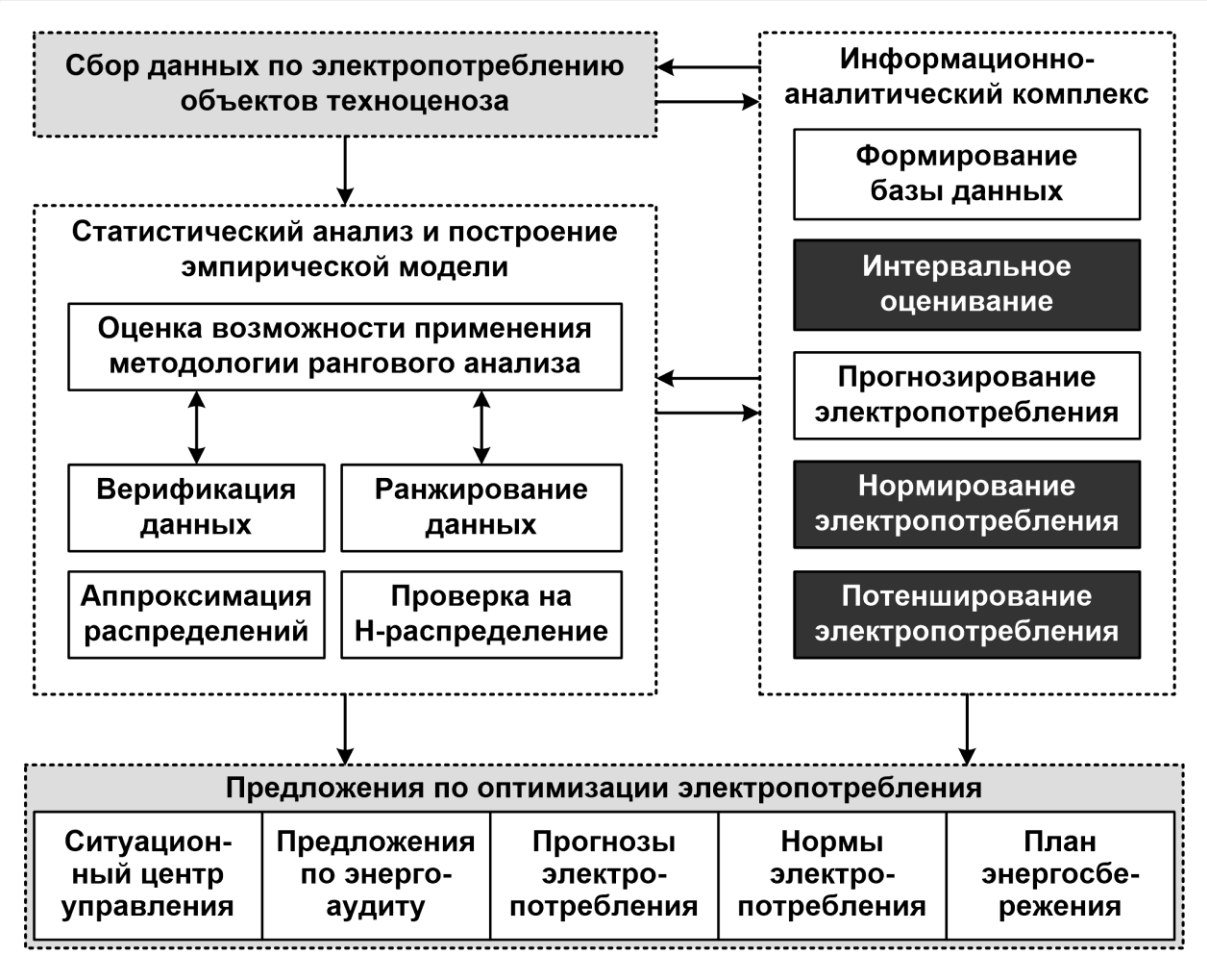


Рис. 2. Статическая модель электропотребления техноценоза

Электроснабжение – обеспечение потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества. Оно осуществляется с целью поддержания в точках раздела с потребителями договорных количественно-качественных показателей электроэнергии, при условии выполне-

ния требований надежности. Очевидно, что показатели качества электроснабжения не отражают качество процесса электропотребления, под которым понимается управляемый (фиксируемый в базе данных, дифлексируемый, прогнозируемый, нормируемый и потеншируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками и/или потребителями, осуществляемый в составе техноценоза (рис. 2). 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 процесса.

Ранее нами в рамках процедуры дифлекс-анализа (рис. 3) был предложен параметр, описывающий качество электропотребления [2,4-11].

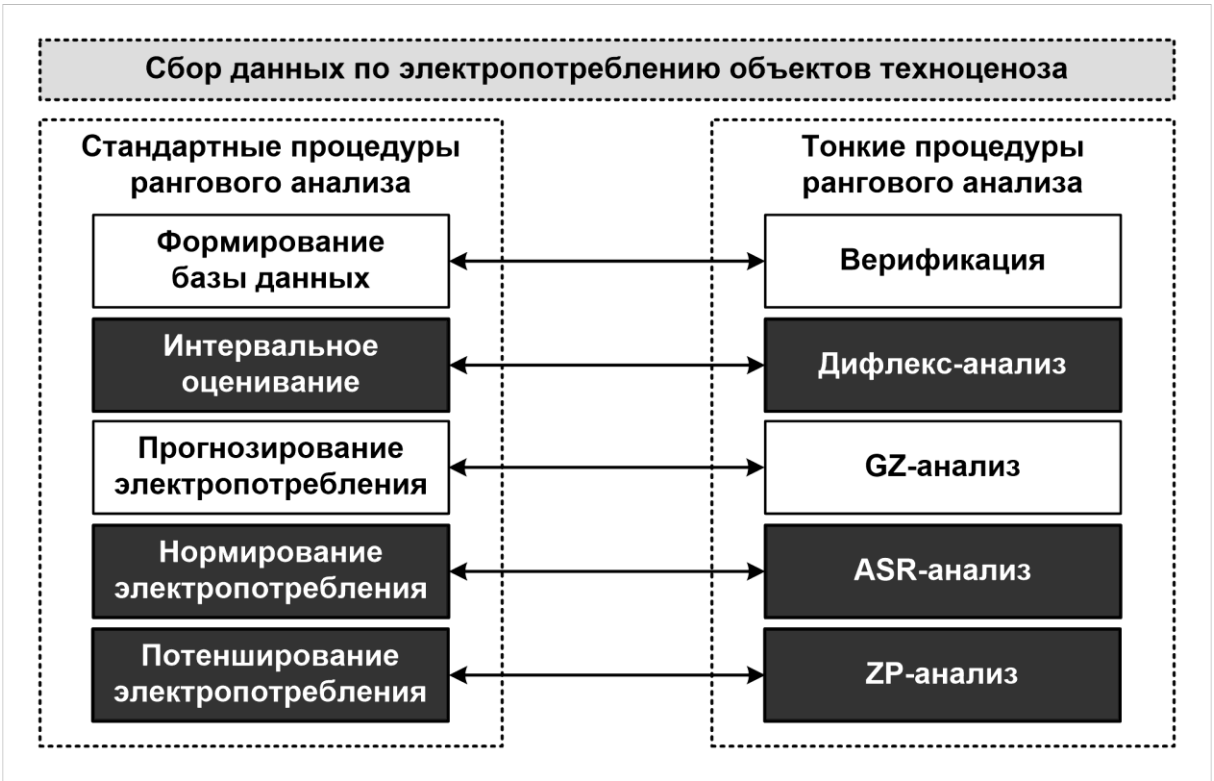


Рис. 3. Стандартные и тонкие процедуры в общем процедурном комплексе рангового анализа

Напомним, что дифлекс-анализ – тонкая процедура рангового анализа техноценозов, осуществляемая на этапе интервального оценивания с целью разработки плана углубленных обследований «аномальных» объектов на среднесрочную перспективу (до 5 – 7 лет). Предполагается, что в каче-

стве 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 техноценозов из разных предметных областей позволило подтвердить нормальность распределения значений электропотребления, соотносимых с фиксированной ранговой топологической мерой в различные моменты времени (рис. 4) [4-11].

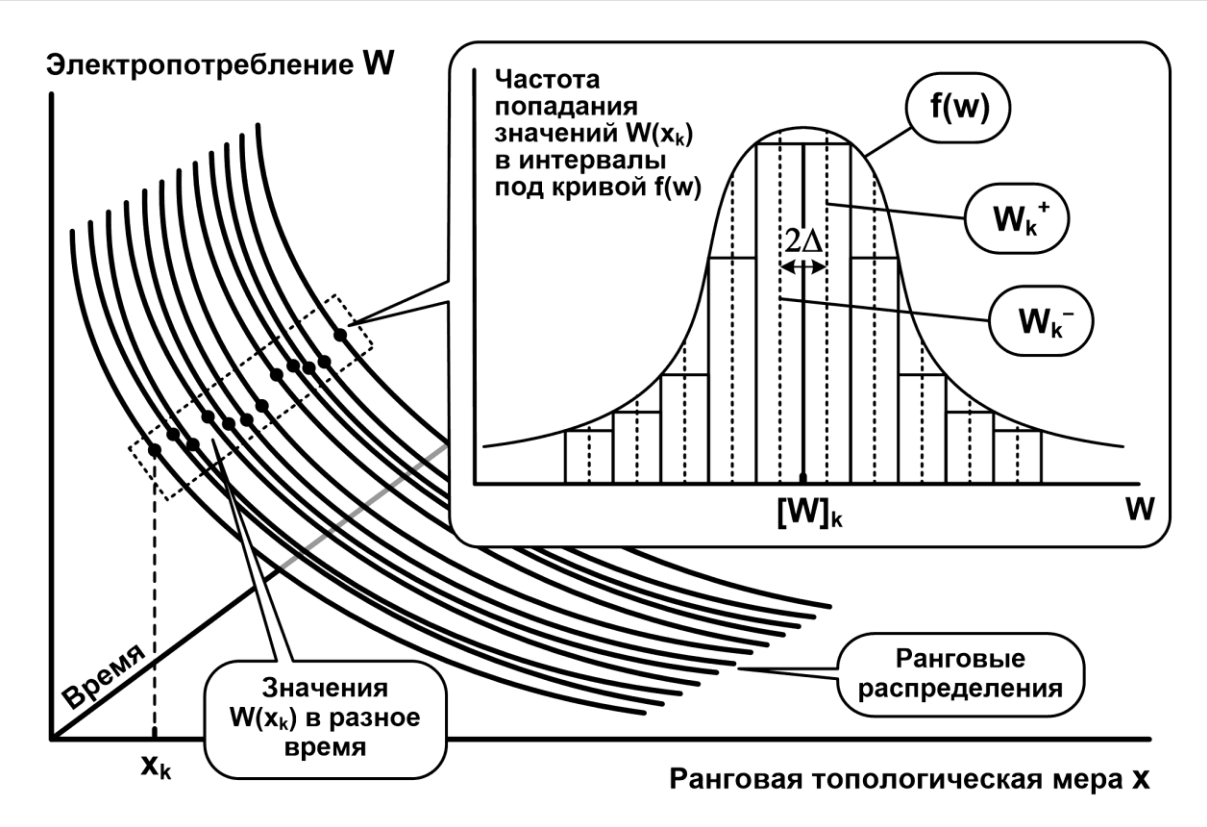


Рис. 4. Границы доверительных интервалов рангов техноценоза, соответствующие k-ой ранговой топологической мере x_k

Как известно, если W^a служит оценкой неизвестного параметра W, то доверительным называется интервал $[W^a - \varpi, W^a + \varpi]$, который покрывает неизвестный параметр с надежностью γ и точностью ϖ:

$$P\left(W^a - \varpi < W < W^a + \varpi\right) = \gamma. \qquad (1)$$

Если случайная величина W распределена нормально, то по данным выборки объемом n можно ввести случайную величину T, которая имеет распределение Стьюдента с k = n – 1 степенями свободы:

$$T = \frac{[W] - M}{S / \sqrt{n}}, \tag{2}$$

где [W] – выборочное среднее случайной величины W;
M – неизвестное математическое ожидание;
S – исправленное среднее квадратичное отклонение.

Плотность распределения Стьюдента определяется выражением:

$$S(z,n) = \frac{\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi(n-1)} \cdot \Gamma((n-1)/2)} \left(1 + \frac{z^2}{n-1}\right)^{-n/2}, \tag{3}$$

где $\Gamma(y) = \int_0^\infty u^{y-1} e^{-u} du$ – гамма-функция Эйлера;

S(z,n) – плотность распределения Стьюдента;
z – табличное значение распределения;
u – формальная переменная интегрирования.

Как видно из (3), распределение Стьюдента определяется одним параметром – объемом выборки n и не зависит от неизвестных величин. Так как гамма-функция Эйлера представляет собой абсолютно сходящийся интеграл, а S(z,n) – четная функция от z, то вероятность неравенства:

$$\frac{[W] - M}{S / \sqrt{n}} < z_\gamma \quad \text{определяется следующим условием:} \tag{4}$$

$$P\left(\left|\frac{[W] - M}{S / \sqrt{n}}\right| < z_\gamma\right) = 2\int_0^{z_\gamma} S(z,n)dz = \gamma. \tag{5}$$

При замене строгого неравенства в выражении (4) двойным неравенством, а также с учетом уравнения (5) получаем вероятностную оценку неизвестного математического ожидания M с надежностью γ:

$$P\left([W] - z_\gamma S / \sqrt{n} < M < [W] + z_\gamma S / \sqrt{n}\right) = \gamma. \tag{6}$$

При замене случайных величин [W] и S (заглавные) неслучайными величинами [w] и s (строчные), найденными по выборке, получается доверительный интервал, покрывающий неизвестный параметр M с надежностью γ. Как показано на рисунке 4, нижняя и верхняя границы доверительных интервалов для любого $W(x_k)$ определяются следующим образом:

$$\left(([w]-z_\gamma\, s/\sqrt{n}),\ ([w]+z_\gamma\, s/\sqrt{n})\right), \qquad (7)$$

где [w] – выборочное среднее (находится по выборке);
s – выборочное среднее квадратичное отклонение по выборке;
z_γ – аргумент (находится таблично по заданным n и γ);
n – объем выборки.

В исследовании управления электропотреблением неизвестным параметром для фиксированного ранга является истинное электропотребление W, а его оценкой выступает выборочное среднее [w]. Получаемая область допустимых значений ассоциируется с Z1-потенциалом энергосбережения в процедурах потенширования и ZP-анализа (см. рис. 2 и 3) [2,4] и позволяет вычислять дифлекс-параметры в процедуре дифлекс-анализа [9,10]. Следует отметить, что данная задача не менее успешно решается методами комбинаторного [6] и векторного [7] рангового анализа.

Идентификация объекта управления

После расчета для каждого из рангов границ доверительных интервалов осуществляется аппроксимация нижней и верхней границ области допустимых значений электропотребления техноценоза (рис. 5). Как мы полагаем, область допустимых значений заключает в себе, своего рода, зону «физически нормального» разброса значений электропотребления для данного техноценоза на данном интервале времени (с учетом возможных труднопредсказуемых колебаний значительного количества объективных факторов, влияющих на процесс электропотребления). При этом, учитывая, что расчеты осуществляются на эмпирических данных самого техноценоза, можно сделать вывод, что подобный уровень электропотребления одновременно является и достаточным для объектов (с технологической точки зрения). Если исходить из цели минимизации расходования энергетических ресурсов, то логично предположить, что нижняя граница области допустимых значений показывает уровень наилучшего электропотребления. Отклонение же от нижней границы (как в большую, так и в меньшую стороны) можно считать показателем качества процесса электропотребления, который предлагается описывать дифлекс-показателем [2,4,9].

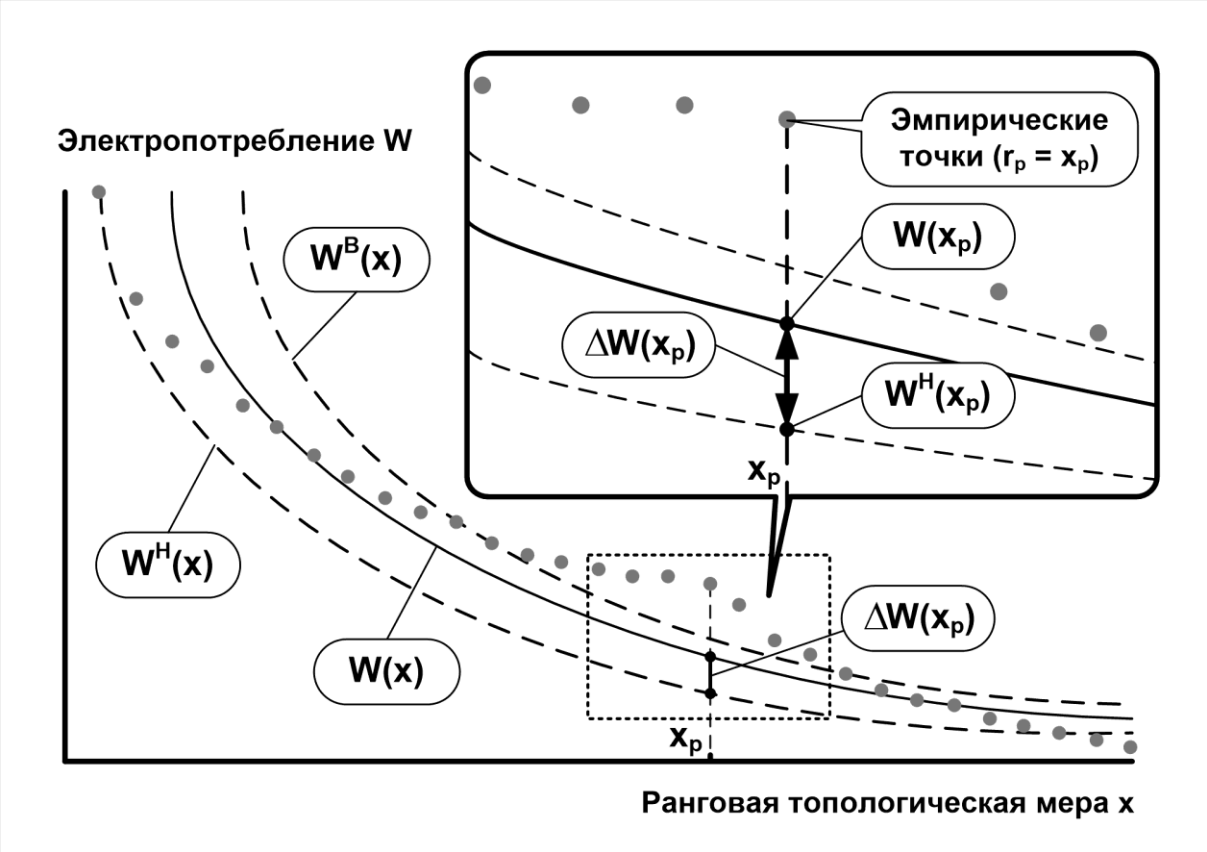


Рис. 5. К понятию топологического дифлекс-параметра техноценоза (x_p – расчетное значение ранговой топологической меры)

Итак, дифлекс-показатель – это мера, отражающая свойство объектов техноценоза (приемников и/или потребителей) осуществлять процесс электропотребления с большей или меньшей степенью энергоэффективности. Количественно же дифлекс-показатель описывается ранговым дифлекс-параметром, под которым понимается, измеряемое в кВт·ч\Т, абсолютное отклонение эмпирического значения электропотребления объекта техноценоза от нижней границы области допустимых значений [8] (рис. 5).

Как показано в работах [2,9,10], 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. Подобное континуальное представление позволяет установить важное функциональное соответствие между областью значений топологического дифлекс-параметра и множеством значений ранговой топологической меры (рис. 5):

$$\Delta W(x) = W(x) - W^H(x),\ x \in [0, +\infty), \tag{8}$$

где $\Delta W(x)$ – гиперболическая зависимость топологического дифлекс-параметра от ранговой топологической меры;
$W(x)$ – аппроксимационная кривая рангового распределения;
$W^{H}(x)$ – аппроксимационная кривая нижней границы области допустимых значений техноценоза.

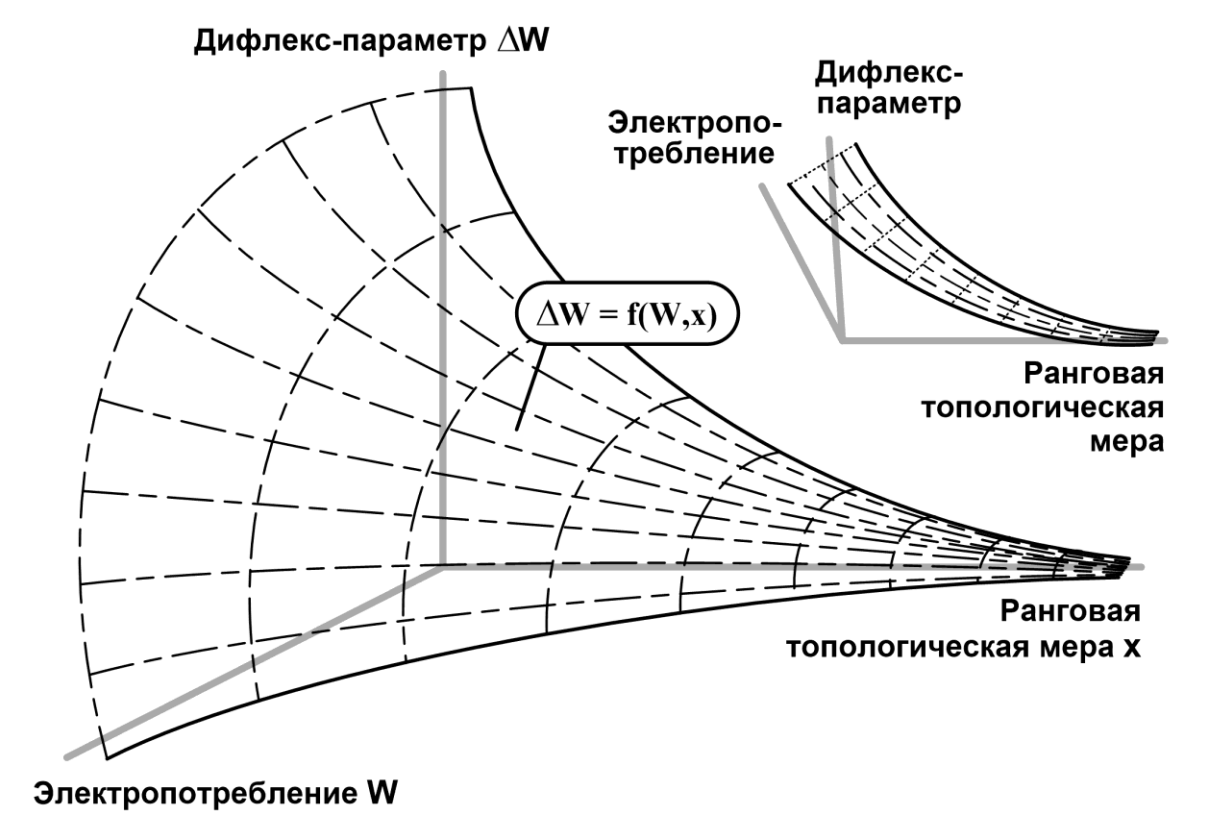
Остается задача полноценной характеристики процесса электропотребления одновременно как с количественной, так и с качественной точек зрения, которая в [8-10] впервые решается введением принципиально новых понятий. Первое из них – ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза, под которой понимается 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:

$$\begin{cases} \{\Delta W\}_0^{+\infty} \xrightarrow[f:\,\Delta W \to W,X]{} \{W,X\}_0^{+\infty}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} \Delta W(W,x); \\ \{\Delta W\}_0^{+\infty} \xrightarrow[f:\,\Delta W \to W,X,A]{} \{W,X,A\}_0^{+\infty}] \xrightarrow[\text{Approx}]{} \Delta W(W,x,\alpha), \end{cases} \tag{9}$$

где $\{\Delta W\}_0^{+\infty}$ – множество значений дифлекс-параметра;
$\{W,X\}_0^{+\infty}$ – множество пар значений электропотребления и ранговой топологической меры;
$\{W,X,A\}_0^{+\infty}$ – множество троек значений электропотребления, ранговой топологической меры и дифлекс-угла α;
Approx – обозначение процедуры аппроксимации.

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

$$\begin{cases} \Delta W = f(W,x); \\ \Delta W = f(W,x,\alpha). \end{cases} \tag{10}$$



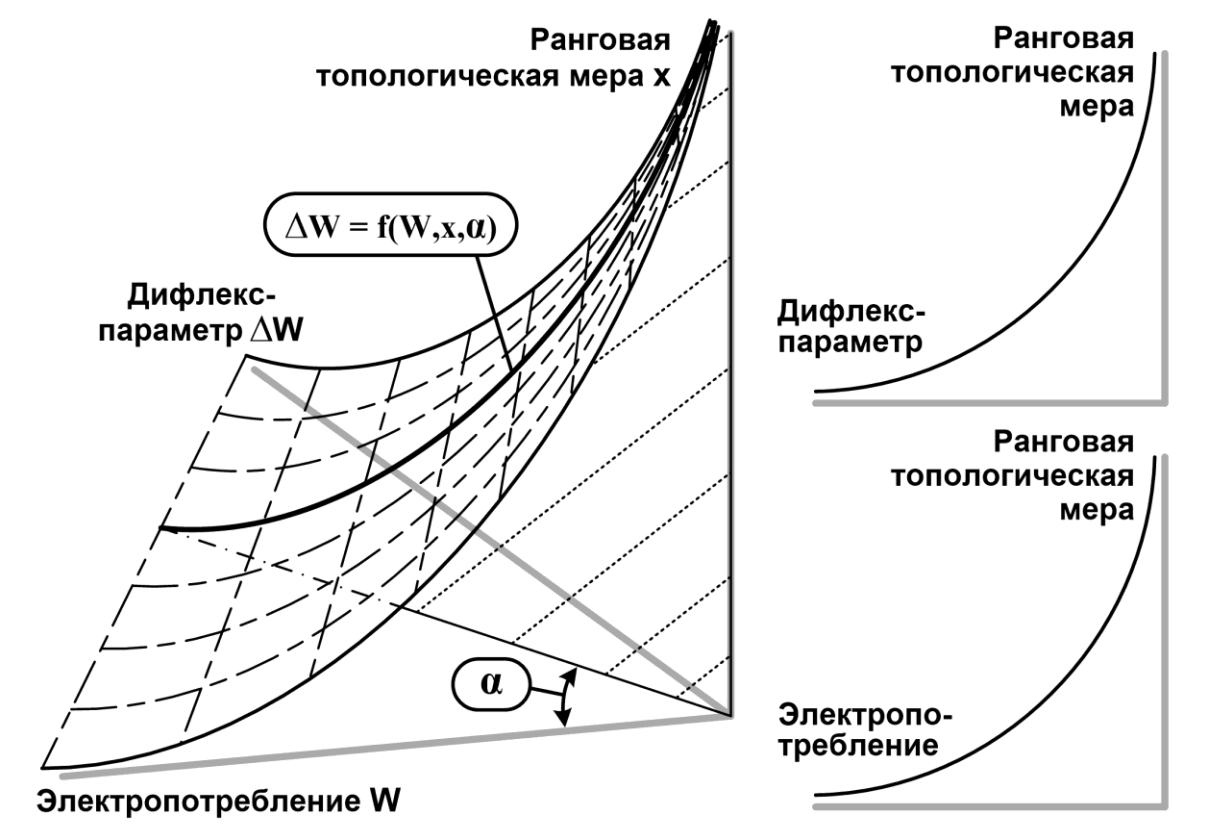


Рис. 6. Ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение

Из рисунка 6 видно, что мы имеем дело с гиперболическими аффинной поверхностью и кривой второго порядка. Они асимптотически приближаются, с одной стороны, к координатной оси ранговой топологической меры ⟨x⟩, а с другой – к координатной плоскости ⟨ΔW◦W⟩.

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 ⟨W◦x⟩ и ⟨ΔW◦x⟩ она имеет пересечения, которые являются гиперболическими кривыми первого порядка 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 ⟨x⟩. Континуум возможных положений секущей плоскости образует пучок в положительном секторе между координатными осями ⟨W⟩ и ⟨ΔW⟩. Очевидно, что форма рангового гиперпараметрического распределения зависит от угла поворота секущей плоскости по отношению к координатной плоскости ⟨W◦x⟩, который обозначен на рисунке как α. Именно его предлагается называть дифлекс-углом рангового гиперпараметрического распределения техноценоза [2,8,9].

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): α = 0 – состояние с нулевым дифлекс-параметром во всем диапазоне значений электропотребления; α = 90 – состояние с нулевым электропотреблением во всем диапазоне значений дифлекс-параметров. Состояние с α = 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 изначальным в общем процессе управления электропотреблением. Состояние с α = 90 соответствует техноценозу, интегральное электропотребление которого равно нулю, что, по сути, означает полное прекращению процесса электропотребления. Очевидно, что реальный техноценоз всегда будет соответствовать некоторому промежуточному значению дифлекс-угла, который в процессе оптимального управления электропотреблением должен последовательно увеличиваться от своего начального значения α^b до целевого α^e. При этом мы получаем состояние, своего рода, ми-

нимакса: минимальный интегральный дифлекс-параметр при максимальном значении дифлекс-угла, т.е. минимуме интегрального электропотребления техноценоза. Другими словами, именно в этом состоянии техноценоз достигает своей наивысшей энергоэффективности, что, в известном смысле, можно считать целью процесса управления электропотреблением.

Что же нам дают описанные здесь инструменты рангового анализа? 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:

$$\int_S \Delta W(W,x)\,ds, \tag{11}$$

где $\Delta W(W,x)$ – скалярная функция ранговой гиперпараметрической поверхности техноценоза по электропотреблению;
ds – элемент поверхности интегрирования.

В данном случае мы имеем дело с поверхностным интегралом первого рода на скалярном поле $\{\Re\}$, вычисляемым по аффинной поверхности второго порядка $\Delta W(W,x)$ в трехмерном пространстве $\langle \Delta W \circ W \circ x \rangle$. Рассчитав интеграл в бесконечных пределах, получаем интегральный дифлекс-параметр техноценоза по электропотреблению ΔW_Σ, который характеризует процесс электропотребления с качественной точки зрения.

Дополним параметр (11) количественным условием, построим целевые функции, определим полную систему ограничений для всех ключевых параметров и введем комплексный критерий оценки вида [8,9]:

$$\begin{cases} \Delta W_\Sigma = \int_S \Delta W(W,x)\,ds \xrightarrow[{[0;+\infty)\subset\{R\}}]{} \min; \\ \alpha = \xrightarrow[{\left\{\alpha^b \to \alpha^e\right\} \equiv \left\{\left(W_\Sigma^b = \int_0^{+\infty} W(x)\,dx\right) \to W_\Sigma^e\right\}}]{} \max; \\ \Delta W \ge 0;\ W \ge 0;\ x \ge 0;\ W_\Sigma^b \ge W_\Sigma^e; \\ 0 \le \alpha \le 90^\circ,\ \alpha = \mathrm{arctg}\left(\Delta W / W\right), \end{cases} \tag{12}$$

где W_Σ^b и W_Σ^e – начальное и конечное электропотребление.

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

$$\begin{cases} \Delta W_{\Sigma} = \int\limits_{\ell} \Delta W(W, x, \alpha)\, d\ell; \\ \alpha = const, \end{cases} \tag{13}$$

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

$d\ell$ – элемент кривой интегрирования.

Как представляется, аналитическая форма рангового гиперпараметрического распределения техноценоза может быть определена теоретически методами дифференциальной геометрии либо эмпирически путем аппроксимации имеющихся данных по электропотреблению [8,9,10].

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. Его предлагается называть интегральным дамадж-параметром (от англ. «damage»). С учетом текущего тарифа sc^{τ} можно записать:

$$\begin{cases} D_{\Sigma}^{w} = \Delta W_{\Sigma}^{\tau} - \Delta W_{\Sigma}^{e}; \\ D_{\Sigma}^{f} = \left(\Delta W_{\Sigma}^{\tau} - \Delta W_{\Sigma}^{e}\right) \cdot sc^{\tau}, \end{cases} \tag{14}$$

где D_{Σ}^{w} – интегральный дамадж-параметр техноценоза, кВт·ч\Т;

D_{Σ}^{f} – интегральный дамадж-параметр техноценоза, пересчитанный в соответствии с текущим тарифом sc^{τ};

ΔW_{Σ}^{τ} – текущий интегральный дифлекс-параметр, кВт·ч\Т;

ΔW_{Σ}^{e} – интегральный дифлекс-параметр, соответствующий конечному электропотреблению техноценоза.

Существенные перспективы таит в себе переход к динамической оценке, что потребует введения динамических дифлекс-функционалов:

$$\begin{cases} \Delta W(t) = F^{w}(W(t), x); \\ \alpha(t) = F^{\alpha}(W(t), x). \end{cases} \tag{15}$$

Постановка задачи управления

Процесс управления электропотреблением, имеющий целью приведения системы в конечное состояние, заданное планом повышения энергоэффективности, требует пошагового управления [3,9]. На каждом шагу требуется снижение совокупного электропотребления объектов техноценоза на определенную величину. В конечном итоге техноценоз должен быть гарантированно переведен в целевое состояние с наименьшими операционными затратами на управленческий процесс (рис. 7). При планировании задаются начальное и конечное ранговые гиперпараметрические распределения $\Delta W(W,x,\alpha)$, а также начальное и конечное значения дифлекс-функционала $F^W(W(t),x)$. Следовательно, промежуточные состояния техноценоза однозначно характеризуются дифлекс-функционалом $F^\alpha(W(t),x)$, определяющим соответствующие значения дифлекс-угла (см. (15)).

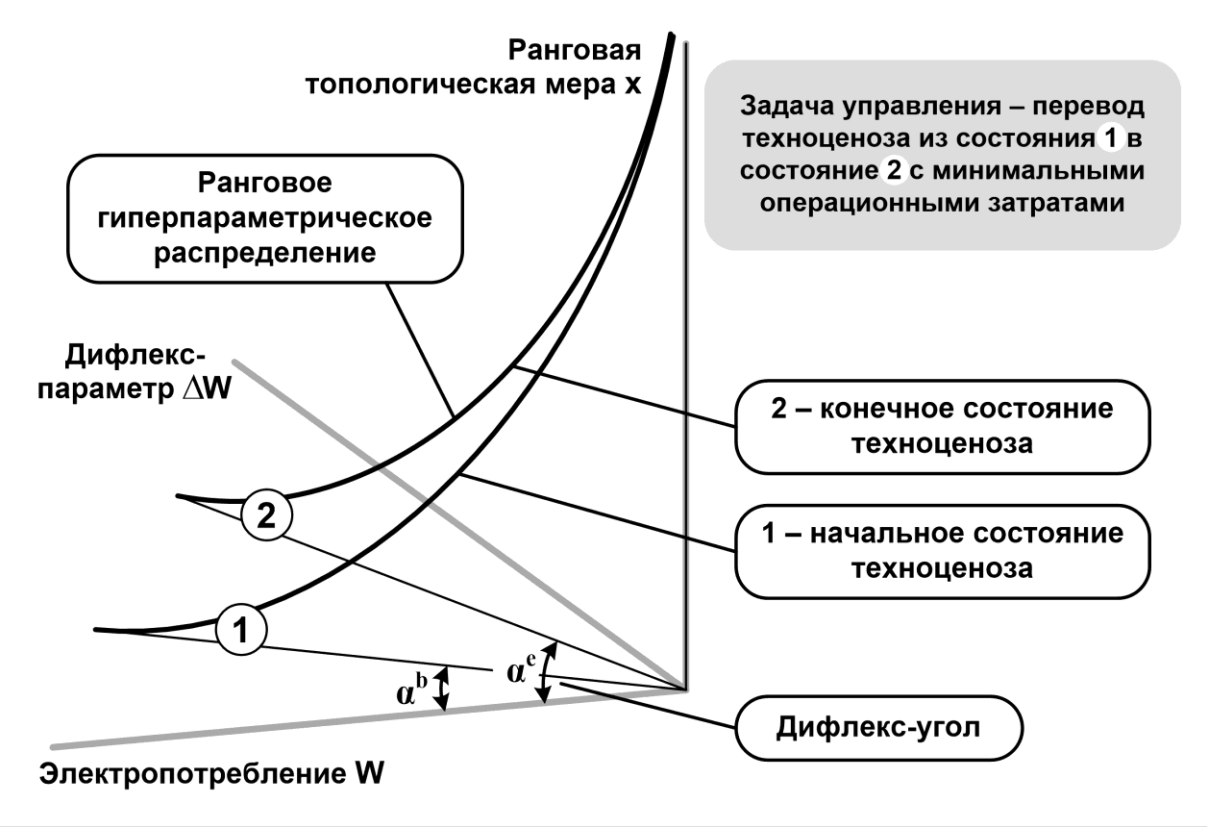


Рис. 7. К постановке задачи управления электропотреблением с помощь ранговых гиперпараметрических распределений

Введем понятие операционной функции процесса управления электропотреблением техноценоза как соотношения, описывающего зависимость между положительным эффектом и операционными затратам [3]:

$$f(\Delta W, W) = \delta\big(\Delta W(\alpha), W(\alpha)\big) = \delta\big(\alpha\big), \tag{16}$$

где $\delta(\alpha)$ – дифлекс-функция процесса управления электропотреблением объектов техноценоза;

$\Delta W(\alpha)$ – дифлекс-параметр рангового гиперпараметрического распределения, рассчитанный для состояния, соответствующего дифлекс-углу α;

$W(\alpha)$ – электропотребление на ранговом гиперпараметрическом распределении, рассчитанное для состояния, соответствующего дифлекс-углу α;

α – дифлекс-угол рангового гиперпараметрического распределения техноценоза.

Будем исходить из того, что дифлекс-параметр количественно характеризует операционные затраты (ресурсов, времени и др.) техноценоза на реализацию управленческих процедур, а электропотребление – положительный эффект, получаемый в процессе управления, что делает возможным рассматривать зависимость (16) как операционную функцию.

Из рисунка 6 видно, что при фиксированном значении дифлекс-угла, дифлекс-функция превращается в константу, имеющую смысл относительного дифлекс-параметра техноценоза, будучи взятого в целом. Учитывая строгую тригонометрическую форму зависимости от дифлекс-угла, данную константу предлагается называть тангенс-фактором δ^{α}:

$$\delta^{\alpha} = \mathrm{tg}\alpha = \frac{\Delta W^{\alpha}(x_k)}{W^{\alpha}(x_k)},\ \alpha = \mathrm{const};\ x_k \in [0, \infty), \tag{17}$$

где $\Delta W^{\alpha}(x_k)$ – дифлекс-параметр, соответствующий углу α и значению ранговой топологической меры x_k;

$W^{\alpha}(x_k)$ – электропотребление, соответствующее α и x_k.

Как представляется, впервые вводимый здесь тангенс-фактор рангового гиперпараметрического распределения по электропотреблению может иметь существенное значение в теории рангового анализа техноценозов по двум основным причинам (рис. 8). Во-первых, он однозначно характеризует фиксируемый этап управленческого процесса в техноценозе, а во-вторых, является устойчивой во времени случайной величиной. Это открывает перспективы использования тангенс-фактора в качестве еще одного детерминированного инварианта при имитационном моделировании в контуре управления электропотреблением техноценоза [2,8-11].

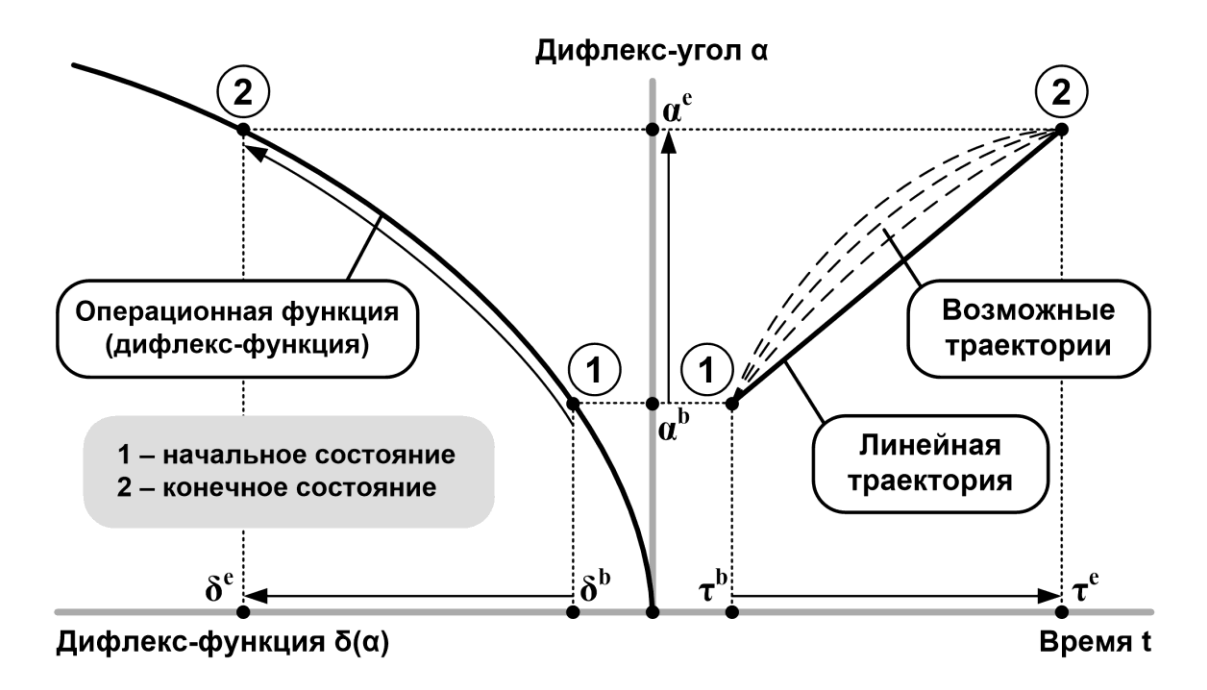


Рис. 8. Операционная функция управления электропотреблением

Итак, управление электропотреблением, имеющее целью приведение системы из состояния 1 в состояние 2 (рис. 7 и 8), должно осуществляться по траектории, близкой к линейной, т.е. к системе (12) можно добавить:

$$\partial\alpha(t) / \partial t \to \text{const}. \tag{18}$$

Следует заметить, что выражение (18) основывается на общих требованиях к операционным функциям организационных систем [3].

Квантовая ранговая динамика

Если говорить о современном состоянии теории управления техноценозами, то наименее разработанной представляется область идентификации техноценоза как объекта управления. Остаются нерешенными ряд ключевых задач, касающихся методологии определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений. Кроме того, недостаточно исследованы закономерности ранговой динамики в топологическом пространстве, что не позволяет считать решенной проблему моделирования положения точек, соответствующих объектам техноценоза на ранговых гиперпараметрических распределениях.

Так, система (12), вместе с требованием (18), позволяет на каждом этапе управленческого процесса получать целевую аппроксимационную кривую рангового распределения. Однако для разработки детального управляющего воздействия необходимо на данной кривой зафиксировать

положение каждого из объектов. Проявляющийся при исследовании техноценозов феномен негауссовости дисконтинуальных фракталоподобных сред делает невозможным непосредственное применение статистических методов, предназначенных для работы с выборками данных, имеющими устойчивые моменты [9]. Более того, дисконтинуальность и фракталоподобность порождает случайные явления, лежащие за пределами колмогоровской теории вероятностей и математической статистики. Исследуя поведение объектов техноценоза, мы находим различные проявления некоего аналога корпускулярно-волнового дуализма [1]. Как показали многолетние исследования, положение объектов в ранговом топологическом пространстве лучше описывается волновыми функциями, связанными с континуальной ранговой топологической мерой. В то же время, гораздо худшие результаты дает их привязка к целочисленным рангам, выполняемая на основе имитационного моделирования. Математическое описание этих явлений находится в области квантовой теории вероятностей – некоммутативного аналога классической (колмогоровской) теории вероятности [1].

Следует отметить, что очень многие из создателей классической квантовой теории неоднократно отмечали, что квантовые эффекты присущи не только микро-, но и макрообъектам. В подтверждение этого к настоящему времени создан целый ряд приложений квантовой теории в таких областях, как астрофизика, электроника, оптика, минералогия, информатика, биология, экономика, психология и др. Мы полагаем, что квантовая теория применима и в области ранговой динамики техноценозов. В частности, здесь наблюдается квантовый эффект и, как следствие, выполняется принцип неопределенности. Квантовый эффект в техноценозе проявляется в том, что скачкообразное перемещение объекта из одного ранга в другой становится возможным лишь когда его параметр изменяется на определенное значение, задаваемое формой рангового гиперпараметрического распределения техноценоза в данный момент времени и пропорциональное минимальному значению параметра (параметрическому «кванту»).

Принцип неопределенности заключается в следующем. Объект техноценоза находится в определенном ранге лишь с некоторой вероятностью. Другими словами, он в своем состоянии, как бы «размазан» в окрестности ранга. В то же время, ранговое гиперпараметрическое распределение фиксируется на ранговой гиперпараметрической поверхности под определенным дифлекс-углом тоже с определенной вероятностью («размазано» в окрестностях аппроксимационной кривой). Однако форма рангового гиперпараметрического распределения зависит от положения точек объектов в топологическом пространстве. Это приводит к тому, что в заданный момент времени невозможно одновременно точно определить координаты точки объекта в ранговом топологическом пространстве, с одной стороны, и координаты точки на ранговом гиперпараметрическом распределении, соответствующей данному объекту, с другой стороны.

Также как и в классической квантовой теории, для нас остается до конца не ясным вопрос, в чем же заключается причина подобного поведения точек в ранговом топологическом пространстве. Многие из современных физиков склоняются к тому, что причиной классических квантовых эффектов является наличие во Вселенной дополнительных измерений, которые проявляют себя лишь на планковском уровне. Мы, глядя на ранговое топологическое пространство техноценоза ⟨W∘x∘ΔW∘α⟩, изображенное на рисунке 9, тоже видим в нем четыре измерения: электропотребление – ранговая топологическая мера – дифлекс-параметр – дифлекс-угол.

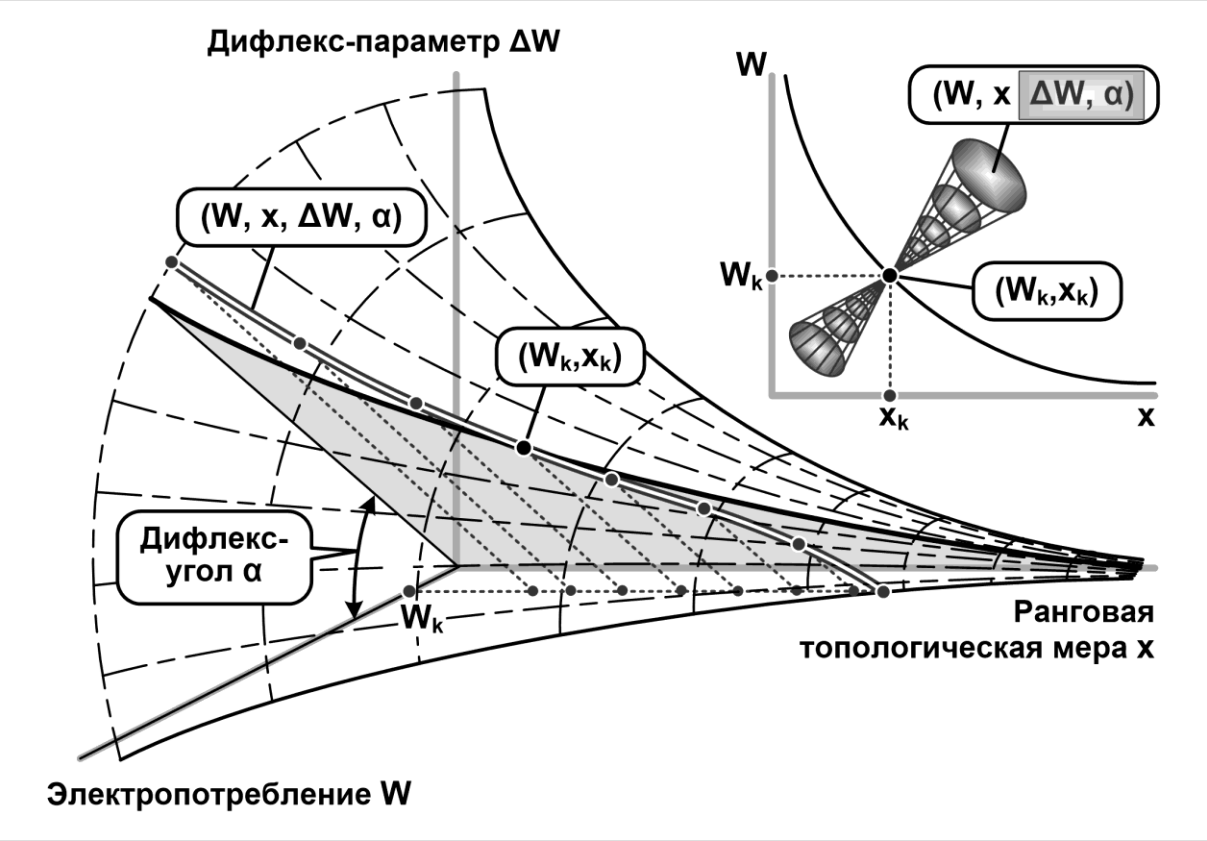


Рис. 9. О многомерности и причинах проявления квантовых эффектов в ранговом топологическом пространстве

На рисунке в основной его части, где показана ранговая гиперпараметрическая поверхность, можно увидеть интересный эффект. На текущем ранговом гиперпараметрическом распределении, зафиксированном под дифлекс-углом α на ранговой гиперпараметрической поверхности, можно задать единственную k-ую точку с координатами (W_k,x_k), которая обозначена в центре рисунка. Другими словами, на этой кривой имеется лишь одна точка, соответствующая данному значению электропотребления W_k. Однако если мы выйдем за пределы кривой, то на ранговой гиперпараметрической поверхности мы можем найти множество точек (в пределе бес-

конечное), электропотребление которых будет таким же. На рисунке 9 для иллюстрации данного удивительного явления показан ряд точек. Все они, включая и нашу основную (самая крупная точка), принадлежат кривой второго порядка, являющуюся результатом косого сечения ранговой гиперпараметрической поверхности (бело-серая S-образная кривая).

Очевидно, если оставаться строго в секущей плоскости, расположенной под углом α к координатной плоскости ⟨W∘x⟩ и рассматривать обычное ранговое параметрическое распределение техноценоза по электропотреблению W(x), то ни одной из точек, кроме основной, мы не увидим и будем уверены, что наша точка является единственной и неповторимой. Но теперь мы знаем, что имеется еще множество точек с таким же значением электропотребления, однако, для того чтобы их увидеть, надо выйти за пределы плоскости и оказаться в четырехмерном пространстве. Все это весьма условно проиллюстрировано на рисунке 9 в правой верхней части.

Следует сделать ряд важных замечаний. Во-первых, несмотря на то, что формально на нашем рисунке показан трехмерный объект, на самом деле, здесь присутствует еще одно измерение – дифлекс-угол, который фиксирует положение рангового гиперпараметрического распределения на гиперпараметрической поверхности. По сути, дифлекс-угол является координатой, имеющей смысл времени, т.к. именно он однозначно характеризует необратимое состояние техноценоза по параметру электропотребления. Во-вторых, мы понимаем, что точки равного электропотребления на гиперпараметрической поверхности принадлежат разным ранговым гиперпараметрическим распределениям. Однако из-за ряда проблем, в конечном итоге ассоциируемых у нас с дисконтинуальностью и фракталоподобностью техноценозов, как правило, отсутствует возможность точно определить значения дифлекс-параметра и дифлекс-угла, соответствующие каждой точке (W,x). Таким образом, выборки значений электропотребления, измеренных на объектах техноценоза за промежуток времени, в принципе не могут отвечать обычным статистическим требованиям, т.к. в них могут попасть данные, по сути, из различных генеральных совокупностей.

Весьма интересным, в этом смысле, видится переосмысление явления негауссовости в техноценозе, которое мы формально считаем следствием дисконтинуальности и фракталоподобности. Так, негауссовой считается выборка данных, описываемая негауссовым распределением. Вероятностное распределение называется 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 боль-

шом числе независимых испытаний среднее арифметическое наблюденных значений случайной величины сходится по вероятности к ее математическому ожиданию. В общем случае, любое распределение, для которого не выполняется хотя бы одно из условий, считается негауссовым [2,9,11].

Без разбора фундаментальных причин обычно формально полагают, что негауссовые выборки генерируются дисконтинуальными фракталоподобными средами – ограниченными в пространстве и времени взаимосвязанными совокупностями безгранично делимых объектов, объединенных слабыми связями. Эти выборки описываются с помощью ранговых параметрических распределений, в которых множество значений параметров представляет собой счетное множество, составляющее биекцию с множеством натуральных чисел. В разбиении данного счетного множества просматривается принцип самоподобия, т.к. всегда существует конечное множество, индексирующее набор несюръективных отображений, образующее булеан, то есть такое дисконтинуальное множество, которое состоит из всех собственных и несобственных счетных подмножеств данного множества. Если же исходить из того, что множество значений параметров является единственным непустым подмножеством в однопараметрическом множестве общего параметрического описания объектов, для которого набор несюръективных отображений обязательно выполняется, то можно судить, что мы имеем дело со статистически самоподобной структурой.

Несюръективные отображения можно проитерировать так, что в результате получится система итерированных функций ранговых параметрических распределений, сдвинутых друг относительно друга в ранговом топологическим пространстве на некоторый случайный дифлекс-угол. Их композиция с одной неподвижной точкой и порождает алгебраическую дисконтинуальную фракталоподобную среду. При этом итерированной является функция рангового распределения, полученная путем составления еще одной функции с собой определенное количество раз, а несюръективное отображение не предполагает обязательного выполнения принципа сюрьекции, когда каждому элементу множества определения обязательно ставится в соответствие хотя бы один элемент множества значений.

Как вывод, мы имеем дело с явлениями, лежащими за пределами классической «колмогоровской» теории вероятностей и математической статистики. Это уже область квантовой теории вероятностей – некоммутативного аналога классической теории вероятностей. Известно, что квантовым (некоммутативным) вероятностным пространством называется пара (A,ω), где A является C*-алгеброй (произносится: «си – звезда – алгебра»), а ω – состоянием. Это определение является обобщением вероятностного пространства в классической (колмогоровской) теории вероятностей, в том смысле, что каждое классическое вероятностное пространство всегда порождает квантовое вероятностное пространство, если в качестве A выбрана C*-алгебра ограниченных комплекснозначных измеримых функций [1].

Итак, проявление квантового эффекта и выполнение принципа неопределенности в техноценозе позволяет в области ранговой топологии применить математический аппарат квантовой теории и сформировать на этой основе теорию квантового рангового анализа. При этом наиболее сложные задачи определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений, а также фиксации объектов на них решаются в рамках квантовой ранговой динамики с помощью понятий альфа-функции, дифлекс-функции и волновой функции.

Предположим, что в техноценозе случайным в квантовом смысле является положение рангового гиперпараметрического распределения на ранговой гиперпараметрической поверхности, т.е. случайными величинами выступают дифлекс-угол α и тангенс-фактор δ (рис. 10).

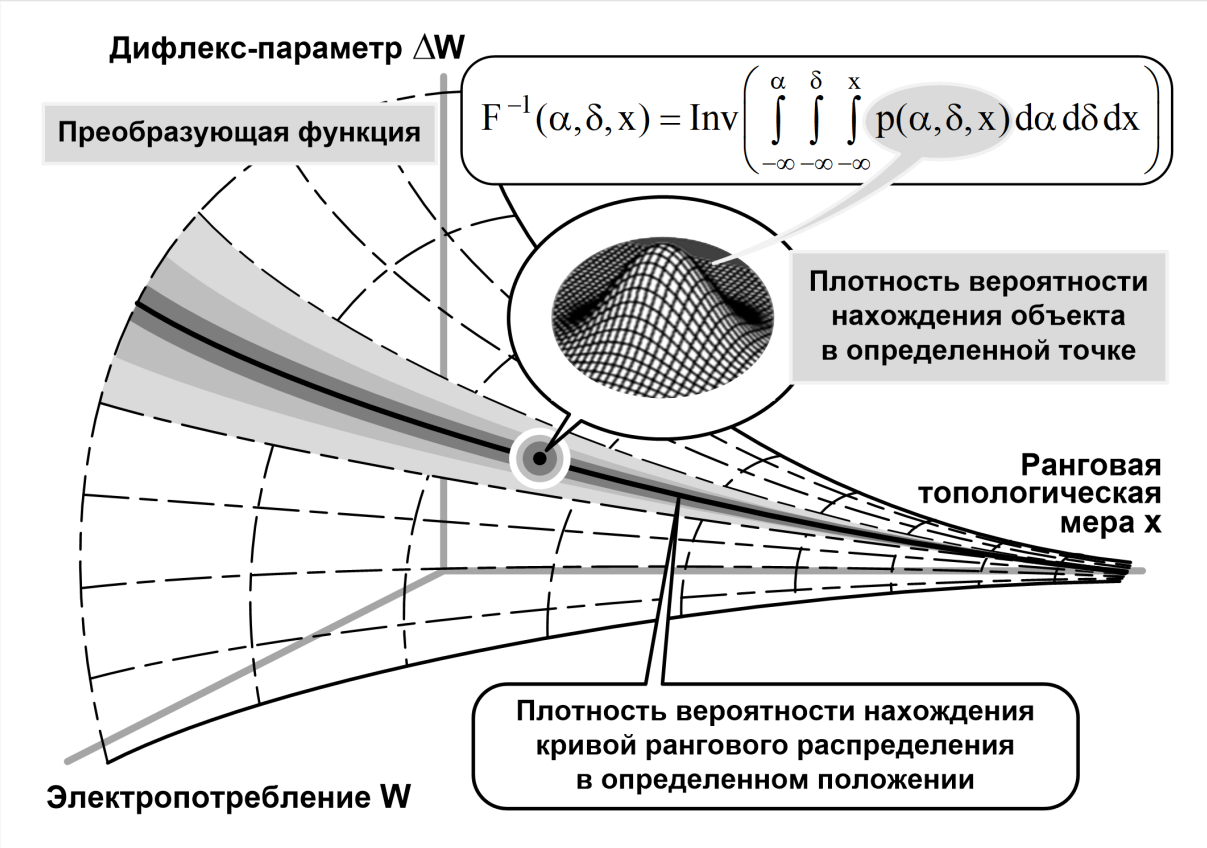


Рис. 10. К оценке плотности вероятности в пространстве ⟨W∘x∘ΔW∘α⟩

Кроме того, случайным в квантовом смысле является положение точки, соответствующей объекту техноценоза, на ранговом гиперпараметрическом распределении (рис. 10), т.е. дополнительной случайной величиной здесь, наряду с дифлекс-углом α и тангенс-фактором δ рангового распределения, выступает значение ранговой топологической меры x.

Вспомним, что ранговая топологическая мера рассматривается как количественная форма, отражающая качественное свойство объекта обла-

дать большим или меньшим значением параметра [8,9]. В конкретном техноценозе 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 точно определить место произвольного значения параметра на ранговом параметрическом распределении устоявшегося техноценоза, и это существенно снижает погрешность отдельных процедур рангового анализа (например, потенширования, параметрического нормирования и параметрического синтеза) [9]. Однако в процессе управления техноценозом в конечном итоге требуется определение вероятности нахождения каждого объекта в том или ином ранге, моделирование и последующая их фиксация на ранговом распределении.

И здесь весьма плодотворной представляется аналогия с квантовыми системами, которая позволяет сформулировать принцип неопределенности. В частности, как мы уже отмечали, для техноценоза, будучи взятого в целом, невозможно одновременно точно определить форму рангового гиперпараметрического распределения $\Delta W(W,x,\alpha)$ и положение кривой этого распределения на ранговой гиперпараметрической поверхности $\Delta W(W,x)$. В то же время, для отдельно взятого объекта невозможно одновременно точно определить само значение параметра W_k и положение точки, соответствующей данному параметру, на ранговом гиперпараметрическом распределении техноценоза $\Delta W(W_k,x_k,\alpha)$. На наш взгляд, здесь можно усмотреть и аналог квантового эффекта. Так, в процессе управления техноценозом, перевести его из одного устойчивого состояния в другое и, соответственно, изменить положение кривой рангового гиперпараметрического распределения на ранговой гиперпараметрической поверхности, можно только затратив определенное количество (квант) ресурсов, строго соответствующее уровню снижения дифлекс-параметра ΔW_Σ. В то же время, точку, соответствующую объекту на ранговом гиперпараметрическом распределении, можно переместить из одного ранга в другой, только изменив значение параметра на величину, пропорциональную наименьшему параметру из всех объектов (своего рода, квант): $(W(x = r_{n-1}) – W(x = r_n))$.

По аналогии с квантовой механикой для описания техноценоза ведем понятие комплекснозначной дифлекс-функции (функции, принимающей комплексные значения в области комплексного аргумента) [1]:

$$\delta(\omega) = f(\omega) = f(Re^{\delta} + jIm^{\delta}), \tag{19}$$

где ω – комплексный аргумент дифлекс-функции $\delta(\omega)$;
Re^{δ} – действительная часть комплексного аргумента;
Im^{δ} – мнимая часть комплексного аргумента;
j – мнимая единица.

Функция $\delta(\omega)$ также может рассматриваться и как пара вещественных функций от двух переменных, определяющих ее составляющие:

$$\delta(\omega) = u(Re^{u}, Im^{u}) + jv(Re^{v}, Im^{v}), \tag{20}$$

где $u(Re^{u}, Im^{u})$ – действительная часть дифлекс-функции;
$v(Re^{v}, Im^{v})$ – мнимая часть дифлекс-функции;
Re^{u}, Re^{v} – действительные части функций u и v;
Im^{u}, Im^{v} – мнимые части функций u и v.

Дифлекс-функцию (20) можно представить и в показательной форме:

$$\delta(\omega) = |\delta| e^{j\alpha}; |\delta| = \sqrt{u^2 + v^2}; \alpha = \mathrm{arctg}(v/u), \tag{21}$$

где $|\delta|$ – модуль функции (относительный дифлекс-параметр);
α – фаза дифлекс-функции (дифлекс-угол).

Следует отметить, что компоненты введенной здесь комплексно-значной дифлекс-функции представляют собой комплексы вида:

$$\begin{cases} u = W + jx; \\ v = \Delta W + jx, \end{cases} \tag{22}$$

где u – комплексная величина в координатной плоскости $\langle W \circ x \rangle$;
v – комплексная величина в координатной плоскости $\langle \Delta W \circ x \rangle$.

Важно учитывать, что между частями разложений (19) – (21) имеется более глубокая связь, например, для того, чтобы дифлекс-функция была дифференцируема в смысле функции комплексной переменной, должны выполняться условия Коши – Римана (Даламбера – Эйлера) [1]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u(Re^u, Im^u)}{\partial (Re^u)} = \dfrac{\partial v(Re^v, Im^v)}{\partial (Im^v)}; \\ \dfrac{\partial u(Re^u, Im^u)}{\partial (Im^v)} = -\dfrac{\partial v(Re^v, Im^v)}{\partial (Re^u)}. \end{cases} \tag{23}$$

Если рассмотреть комплекснозначную дифлекс-функцию как функцию времени в координатном пространстве $\langle W \circ x \circ \Delta W \circ \alpha \rangle$, то можно задать волновую дифлекс-функцию (пси-функцию) $|\delta(t)\rangle = |\alpha,\delta,x\rangle$ – комплекснозначную функцию, используемую здесь для описания, так называемого, чистого (квантового) состояния объектов техноценоза по соответствующему параметру W (электропотреблению). Используем наиболее распространенные символы для волновой функции – греческие буквы ψ и Ψ. Как известно, волновая функция является коэффициентом разложения вектора состояния системы по базису (в данном случае, координатному) [1]:

$$\left|\delta(t)\right\rangle = \left|\psi(t)\right\rangle = \int \Psi(y,t) \left|y\right\rangle dy, \tag{24}$$

где $\Psi(y,t) = \langle y|\psi(t)\rangle$ – волновая функция (пси-функция) в координатном пространстве $\langle W \circ x \circ \Delta W \circ \alpha \rangle$;

$|y\rangle = |\alpha,\delta,x\rangle$ – координатный базисный вектор.

Как представляется, в данном случае применим принцип суперпозиции – фундаментальный принцип, согласно которому, если для некоторой квантовой системы допустимы состояния Ψ_1 и Ψ_2, то допустима и любая их линейная комбинация, которая называется суперпозицией этих состояний (иногда определяют как принцип суперпозиции состояний) [1]:

$$\Psi_3 = C_1\Psi_1 + C_2\Psi_2, \tag{25}$$

где C_1 и C_2 – комплексные коэффициенты.

Если измерение координаты базисного вектора системы в состоянии $|\Psi_1\rangle$ всегда приводит к результату Y_1, а измерение в состоянии $|\Psi_2\rangle$ – к результату Y_2, то измерение координаты в состоянии $|\Psi_3\rangle$ приведет к результатам Y_1 или Y_2 с вероятностями $|C_1|^2$ и $|C_2|^2$, соответственно.

Принцип суперпозиции может быть успешно применен при фиксации объекта техноценоза в момент времени τ на ранговом гиперпараметрическом распределении, соответствующем модулю $\delta(\tau)$ и фазе $\alpha(\tau)$. Для этого необходимо в каждый момент времени знать функцию зависимости

плотности вероятности нахождения объекта в состоянии $|\Psi\rangle$ от ранговой топологической меры (рис. 10). Плотность вероятности, в свою очередь, может быть определена как квадрат модуля волновой функции Ψ:

$$p(\alpha,\delta,x)=|\Psi|^2=\Psi\cdot\Psi^*, \tag{26}$$

где Ψ^* – функция, комплексно сопряженная волновой функции Ψ.

На основе функции плотности вероятности $p(\alpha,\delta,x)$ с использованием известного преобразования может быть получено выражение многомерной функции распределения $F(\alpha,\delta,x)$, которое выглядит следующим образом:

$$F(\alpha,\delta,x)=\int_{-\infty}^{\alpha}\int_{-\infty}^{\delta}\int_{-\infty}^{x}p(\alpha,\delta,x)\,d\alpha\,d\delta\,dx\,. \tag{27}$$

Наконец, вероятность попадания случайной величины (α,δ,x) в некоторый объем V рангового параметрического пространства равна:

$$P\big((\alpha,\delta,x)\subset V\big)=\iiint_V p(\alpha,\delta,x)\,d\alpha\,d\delta\,dx. \tag{28}$$

Преобразующая функция, предназначенная для реализации случайной величины (α,δ,x) в процессе имитационного моделирования, определяется как функция, обратная функции распределения $F^{-1}(\alpha,\delta,x)$:

$$F^{-1}(\alpha,\delta,x)=\mathrm{Inv}\left(\int_{-\infty}^{\alpha}\int_{-\infty}^{\delta}\int_{-\infty}^{x}p(\alpha,\delta,x)\,d\alpha\,d\delta\,dx\right). \tag{29}$$

Известно, что имитационное моделирование положения точки объекта на общем ранговом гиперпараметрическим распределении техноценоза может быть осуществлено путем реализации общей преобразующей функции (29). Однако из-за многомерности данной функции и, как правило, невозможности выразить ее интеграл в элементарных функциях, непосредственное применение (29) в вычислительных алгоритмах затруднено. Тем не менее, имитационное моделирование параметров можно осуществить по упрощенному алгоритму, приведенному на рисунке 11 и предполагающему реализацию частных одномерных преобразующих функций. Ниже приведена система подобных функций следующего вида:

$$\begin{cases} F_{\alpha}^{-1}(\alpha) = \mathrm{Inv}\left(\int\limits_{-\infty}^{\alpha} p(\alpha,\delta,x)\,d\alpha\right),\ \delta = [\delta] = \mathrm{const};\ x = [x_k] = \mathrm{const}; \\ F_{\delta}^{-1}(\delta) = \mathrm{Inv}\left(\int\limits_{-\infty}^{\delta} p(\alpha,\delta,x)\,d\delta\right),\ \alpha = [\alpha] = \mathrm{const};\ x = [x_k] = \mathrm{const}; \\ F_{x}^{-1}(x) = \mathrm{Inv}\left(\int\limits_{-\infty}^{x} p(\alpha,\delta,x)\,dx\right),\ \alpha = [\alpha] = \mathrm{const};\ \delta = [\delta] = \mathrm{const}, \end{cases} \tag{30}$$

где $[\alpha]$, $[\delta]$, $[x_k]$ – математические ожидания α и δ техноценоза, а также ранговой топологической меры k-го объекта.

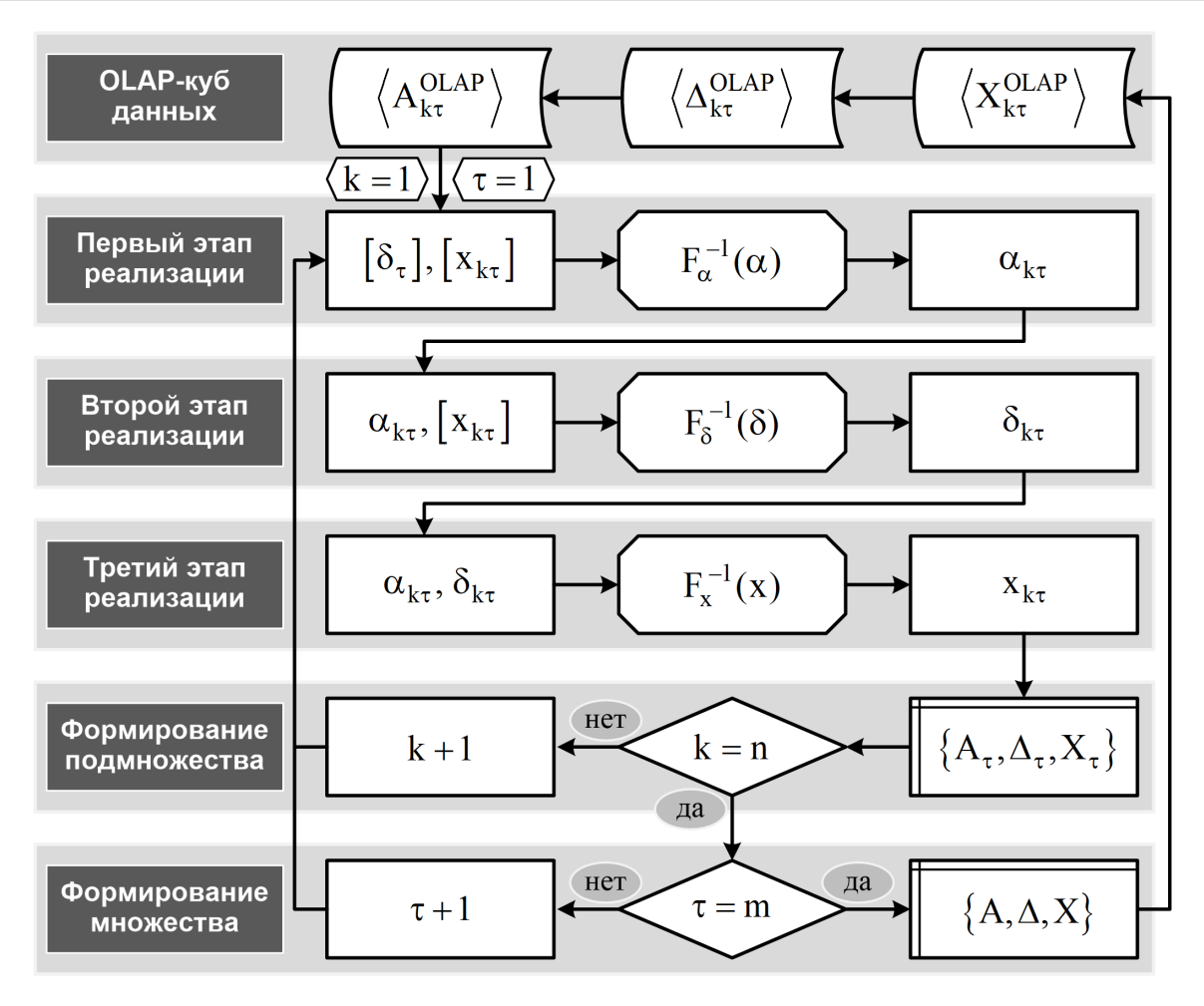


Рис. 11. Схема процесса имитационного моделирования на основе частных преобразующих функций

Применительно к управлению электропотреблением первый этап предлагаемого алгоритма предполагает, что в соответствии с оптимальной стратегией на τ-интервале времени задаются математические ожидания тангенс-фактора техноценоза [δ_τ] и ранговой топологической меры первого объекта [$x_{1\tau}$]. Затем на основе многократной реализации первой преобразующей функции системы (30) определяется первое модельное значение дифлекс-угла техноценоза $\alpha_{1\tau}$. На втором этапе алгоритма в качестве констант задаются модельное значение дифлекс-угла $\alpha_{1\tau}$ (полученное на первом этапе) и математическое ожидание ранговой топологической меры первого объекта [$x_{1\tau}$] (берется то же значение параметра, что и на первом этапе). Далее на основе многократной реализации второй преобразующей функции системы (30) определяется первое модельное значение тангенс-фактора техноценоза $\delta_{1\tau}$. Наконец, на третьем этапе алгоритма в качестве констант задаются полученные на предыдущих этапах первые модельные значения дифлекс-угла $\alpha_{1\tau}$ и тангенс-фактора техноценоза $\delta_{1\tau}$. На основе многократной реализации третьей преобразующей функции (30) определяется модельное значение ранговой топологической меры первого объекта $x_{1\tau}$. Важно учитывать, что все три этапа описанного выше имитационного алгоритма последовательно повторяются для каждого k-го объекта.

После перебора всех n объектов техноценоза появляется возможность сформировать подмножество наиболее вероятных значений координат объектов в ранговом параметрическом пространстве на τ-этапе:

$$\{A_\tau, \Delta_\tau, X_\tau\}_{k=1}^{n} = \{(\alpha_{1\tau}, \delta_{1\tau}, x_{1\tau}), (\alpha_{2\tau}, \delta_{2\tau}, x_{2\tau}) \ldots (\alpha_{k\tau}, \delta_{k\tau}, x_{k\tau}) \ldots (\alpha_{n\tau}, \delta_{n\tau}, x_{n\tau})\}, \quad (31)$$

где $(\alpha_{k\tau}, \delta_{k\tau}, x_{k\tau})$ – координаты k-го объекта на τ-этапе управления.

Подмножество значений $\{A_\tau, \Delta_\tau, X_\tau\}_{k=1}^{n}$ может быть использовано для аппроксимации ранговых распределений $W^\tau(x)$ и $\Delta W^\tau(x)$, а также расчета значений $W^\tau(x_{k\tau})$ и $\Delta W^\tau(x_{k\tau})$ для каждого k-го объекта на τ-этапе управления, которые пополняют слои OLAP-куба цифрового двойника техноценоза по электропотреблению (соответственно, модельных значений электропотребления [MOD], аппроксимационных данных [APP] и дифлекс-параметров [DIF]) [9,10]. Кроме того, на основе значений $W^\tau(x_{k\tau})$ и $\Delta W^\tau(x_{k\tau})$ готовятся исходные данные для продолжения имитационного моделирования и получения подмножества $\{A_{\tau+1}, \Delta_{\tau+1}, X_{\tau+1}\}_{k=1}^{n}$ уже на следующем (τ + 1)-этапе управления электропотреблением техноценоза.

Также на основе расчетов разрабатываются ZP-матрица и ZP-план (план повышения энергоэффективности) [4,9,10], для которых в качестве исходных данных готовится результирующее множество $\{A, \Delta, X\}_{\tau=1}^{m}$:

$$\left\{\begin{matrix} (\alpha_{11},\delta_{11},x_{11}) & (\alpha_{21},\delta_{21},x_{21}) & \dots & (\alpha_{k1},\delta_{k1},x_{k1}) & \dots & (\alpha_{n1},\delta_{n1},x_{n1}) \\ (\alpha_{12},\delta_{12},x_{12}) & (\alpha_{22},\delta_{22},x_{22}) & \dots & (\alpha_{k2},\delta_{k2},x_{k2}) & \dots & (\alpha_{n2},\delta_{n2},x_{n2}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\alpha_{1\tau},\delta_{1\tau},x_{1\tau}) & (\alpha_{2\tau},\delta_{2\tau},x_{2\tau}) & \dots & (\alpha_{k\tau},\delta_{k\tau},x_{k\tau}) & \dots & (\alpha_{n\tau},\delta_{n\tau},x_{n\tau}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\alpha_{1m},\delta_{1m},x_{1m}) & (\alpha_{2m},\delta_{2m},x_{2m}) & \dots & (\alpha_{km},\delta_{km},x_{km}) & \dots & (\alpha_{nm},\delta_{nm},x_{nm}) \end{matrix}\right\}, \tag{32}$$

где $(\alpha_{k\tau},\delta_{k\tau},x_{k\tau})$ – координаты k-го объекта на τ-этапе управления;
n – общее количество объектов техноценоза;
m – общее количество этапов управления.

Следует также отметить, что для численного расчета функций распределения, положенных в основу преобразующих функций (30), могут быть применены методы математической статистики. В качестве исходных данных берутся полученные на предыдущих этапах управления данные из OLAP-куба цифрового двойника по электропотреблению [9,10]:

$$\left\langle W_{\tau}^{OLAP}\right\rangle \xrightarrow[\tau=1..m]{} \left\langle \left\langle W_{1\tau}^{VEC}\right\rangle, \left\langle W_{2\tau}^{VEC}\right\rangle, \left\langle W_{3\tau}^{VEC}\right\rangle, \dots, \left\langle W_{j\tau}^{VEC}\right\rangle, \dots, \left\langle W_{n\tau}^{VEC}\right\rangle \right\rangle, \tag{33}$$

где $\left\langle W_{k\tau}^{VEC}\right\rangle = \left\langle \left\langle W_{k\tau}^{1}\right\rangle, \left\langle W_{k\tau}^{2}\right\rangle, \left\langle W_{k\tau}^{3}\right\rangle, \dots, \left\langle W_{k\tau}^{q}\right\rangle, \dots, \left\langle W_{k\tau}^{s}\right\rangle \right\rangle$;

$\left\langle W_{k\tau}^{VEC}\right\rangle$ – цифровой вектор k-го объекта на τ-этапе;
$\left\langle W_{k\tau}^{q}\right\rangle$ – компонент q-го слоя данных цифрового вектора k-го объекта техноценоза на τ-этапе;
s – общее количество слоев цифрового двойника.

При этом выборочная функция распределения для соответствующего параметра α, δ или x определяется следующим образом. Из множества $\{A,\Delta,X\}_{\tau=1}^{m}$, выгруженного из OLAP-куба (33), осуществляется выборка данных применительно к рассматриваемому τ-этапу управленческого процесса $\{A_{\tau},\Delta_{\tau},X_{\tau}\}_{k=1}^{n}$. Следует отметить, что в общем случае выборки параметров α, δ, x, могут быть негауссовыми, поэтому, прежде чем рассчитывать на них функции распределения, необходимо по любому известному критерию осуществить проверку на выполнение нормального закона распределения. Далее производится упорядочивание данных в порядке не убывания и строится интервальный вариационный ряд для каждого параметра в отдельности. Для точного определения величины частичного интервала можно воспользоваться, например, формулой Стерджиеса. После получения относительной частоты попадания значений каждого параметра

в соответствующий интервал, выборочную (эмпирическую) функцию распределения можно рассчитать по следующему выражению:

$$\begin{cases} 0, \text{ при } y \le y_1; \\ \sum_{i=1}^{\nu} p_i, \text{ при } y_{i-1} < y \le y_i,\ i = 1,2,3,...,\nu; \\ 1, \text{ при } y > y_\nu, \end{cases} \tag{34}$$

где y – соответствующий параметр (α, δ или x);
i – номер интервала;
ν – общее количество интервалов;

$p_i(y) = \frac{g_i(y)}{h(y)}$ – относительная частота попадания значения параметра в i-ый вариационный интервал;
$g_i(y)$ – количество значений рассматриваемого параметра, попавших в i-ый интервал;
$h(y)$ – объем параметрической выборки.

Для получения аналитического выражения выборочной функции распределения любым доступным методом осуществляется аппроксимация системы (34). После этого получаются преобразующие функции (30) и запускается процесс имитационного моделирования (рис. 11), результатом которого становятся множество $\{A,\Delta,X\}$ и ZP-матрица, полностью описывающие процесс управления электропотреблением техноценоза.

Итак, теперь мы готовы перейти к наиболее абстрактному теоретико-множественному описанию объекта управления. При этом задействуем предметную область ранговой топологии – раздела рангового анализа, в котором изучаются свойства ранговых параметрических пространств (множеств параметров с дополнительной структурой рангового типа) [9].

Пусть дано множество R. Система $\{T\}$ его подмножеств называется топологией на R, если выполняются два основных условия (рис. 6) [1]:

1. Объединение произвольного семейства множеств, принадлежащих $\{T\}$, принадлежит $\{T\}$; то есть для любого индексирующего множества S и семейства U_ε, принадлежащего $\{T\}$, выполняется следующее:

$$\bigcup_{\varepsilon \in S} U_\varepsilon \in T \ \forall\ U_\varepsilon \in T,\ \varepsilon \in S;\ (R, \varnothing \in T). \tag{35}$$

2. Пересечение конечного семейства множеств, принадлежащих $\{T\}$, принадлежит $\{T\}$; то есть для любого индексирующего множества S и семейства U_ε, принадлежащего $\{T\}$, выполняется следующее:

$$\bigcap_{i=1}^{q} U_i \in T \; \exists \; U_i \in T, \; i = 1, ..., q; \; (R, \varnothing \in T). \qquad (36)$$

Таким образом, пара (R,{T}) называется ранговым топологическим пространством, в котором под системой подмножеств {T} понимается:

$$\{T\} = \left\{ \{W, \Delta W, X\}_{k=1}^{n} \right\}_{\tau=1}^{m}, \qquad (37)$$

где {W,ΔW,X} – множество значений (W, ΔW, x) – электропотребления, дифлекс-параметров и ранговых топологических мер, соответствующих k-ым объектам техноценоза на τ-интервалах времени (k = 1…n; τ = 1…m).

Зададимся вопросом, а к чему приводят в ранговом топологическом пространстве рассмотренные выше квантовые эффекты. Основной проблемой является то, что при фиксации случайных параметров электропотребления отсутствует возможность гарантировать, что собственно выборка осуществляется из одной и той же генеральной совокупности. Это обусловлено тем, что мы не можем обеспечить, с одной стороны, одновременность снятия данных со счетчиков электроэнергии, установленных на объектах, а с другой – одинаковый уровень декомпозиции объектов на подразделения и пространственно-технологические кластеры. Кроме того, пока до конца не решенной остается задача корректного определения глубины горизонта данных, подгружаемых в цифровой профиль из основной базы данных. Не меньшую неопределенность вносит проблема правильного квазипараллельного разделение потоков данных по электропотреблению в ходе цифровой профилизации. В итоге, техноценоз постоянно изменяется, вследствие чего в одной выборке смешиваются данные, по сути, зафиксированные в различных системах координат. Здесь одинаковые значения параметров электропотребления могут принадлежать различным объектам. Равно как и разные значения электропотребления могут принадлежать одному и тому же объекту. Это в основном и порождает в ранговом топологическом пространстве дисконтинуальную фракталоподобную среду, генерирующую негауссовые выборки данных, о чем уже было сказано [9-11].

Как же решать подобную проблему? Как представляется, наряду с фиксацией тангенс-фактора, описывающего объект одновременно с количественной и качественной точек зрения, следует обязательно учитывать текущее фазовое состояние техноценоза, характеризуемое дифлекс-углом. По сути, в данном случае мы имеем дело с комплексом, модуль которого соответствует электропотреблению, а фаза – состоянию техноценоза, в пределах которого зафиксировано это значение электропотребления.

Таким образом, мы имеем дело с ситуацией, когда в каждой точке рангового топологического пространства изменение дифлекс-угла приводит в системе отсчета к постоянному изменению координатного базиса. И это меняет значения проекций точек на координатные оси, претерпевающие постоянное смещение. Для обеспечения инвариантности в ходе измерения и фиксации данных по электропотреблению на всех этапах управления целесообразно использовать специальный инструмент – тензор электропотребления, который предлагается коротко обозначать как Е-тензор.

Весьма упрощенно тензор можно представить как математическое отражение некоторого абстрактного или конкретного объекта (геометрического или физического), существующего в пространстве в виде таблицы величин (матрицы) – компонент тензора. Значения компонент зависят от принятой системы координат и изменяются (преобразуются) при переходе к другим координатам, однако преобразование компонент таково, что оставляет неизменными некоторые особые величины – инварианты.

Итак, введем тензор электропотребления второго ранга в пространстве (R,{T}), позволяющий преобразовывать координаты эмпирических точек объектов техноценоза с целью приведения их к единому базису:

$$\begin{cases} E:\left(\Omega_{pk}^{\tau}\right)\xrightarrow[(R,\{T\})]{}\left(\Omega_{k}^{\tau}\right); \\ \Omega_{pk}^{\tau}=\left\{\left\{W_{pk}^{\tau},\Delta W_{pk}^{\tau},X_{pk}^{\tau}\right\}_{k=1}^{n}\right\}_{\tau=1}^{m}; \\ \Omega_{k}^{\tau}=\left\{\left\{W_{k}^{\tau},\Delta W_{k}^{\tau},X_{k}^{\tau}\right\}_{k=1}^{n}\right\}_{\tau=1}^{m}, \end{cases} \tag{38}$$

где E – тензор электропотребления второго ранга, преобразующий в ранговом топологическом пространстве координаты (W_p,ΔW_p,x_p) эмпирических точек объектов в координаты (W,ΔW,x) точек, соответствующих объектам на ранговом гиперпараметрическом распределении;

Ω_{pk}^{τ} – определенное на ранговом топологическом пространстве пространство эмпирических точек, соответствующих k-ым объектам техноценоза на τ-интервале;

Ω_{k}^{τ} – определенное на ранговом топологическом пространстве пространство теоретических точек, соответствующих k-ым объектам техноценоза на ранговом гиперпараметрическом распределении на τ-интервале времени;

(R,{T}) – ранговое топологическое пространство.

Тензор электропотребления может быть представлен в различных формах. В случае тензора второго ранга удобной видится весьма наглядная форма представления в виде матрицы преобразования координат:

$$E^{ij} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix}, \tag{39}$$

где e_{ij} – коэффициенты преобразования координат объектов.

При этом правила перехода к другим координатам в общем виде для объектов техноценоза могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} W = e_{11}W_p + e_{12}\Delta W_p + e_{13}x_p; \\ \Delta W = e_{21}W_p + e_{22}\Delta W_p + e_{23}x_p; \\ x = e_{31}W_p + e_{32}\Delta W_p + e_{33}x_p. \end{cases} \tag{40}$$

В данном случае E-тензор определяется как полилинейная (линейная по каждому отдельно взятому аргументу) функция следующего вида:

$$E(F_1, F_2, F_3, \Omega_1, \Omega_2, ..., \Omega_k, ..., \Omega_n), \tag{41}$$

где F_i – линейные функционалы на пространстве Ω;
Ω_k – точки электропотребления объектов в пространстве Ω.

Формально координатами E-тензора в любом базисе будут значения полилинейной функции (41) на различных комбинациях базисных векторов. С учетом симметричной формы ранговой поверхности (рис. 6) можно сделать вывод, что коэффициенты преобразования координат объектов являются функциями, зависящими, в конечном итоге, от дифлекс-угла. В этом случае формально тензор электропотребления приобретает вид:

$$E^{ij} = \begin{bmatrix} F_{11}(\alpha) & F_{12}(\alpha) & F_{13}(\alpha) \\ F_{21}(\alpha) & F_{22}(\alpha) & F_{23}(\alpha) \\ F_{31}(\alpha) & F_{32}(\alpha) & F_{33}(\alpha) \end{bmatrix}, \tag{42}$$

где α – дифлекс-угол, определяющий ранговое гиперпараметрическое распределение на гиперпараметрической поверхности.

В простейшем случае, если принять однородность рангового топологического пространства, ограничиться его первым октантом, в котором дифлекс-угол меняется в диапазоне от нуля до девяноста градусов, а также пренебречь различными возможными эффектами, связанными с флуктуацией скорости изменения дифлекс-угла, получаем E-тензор вида:

$$E^{ij} = \begin{bmatrix} e_{11} & 0 & 0 \\ 0 & e_{22} & 0 \\ 0 & 0 & e_{33} \end{bmatrix}, \qquad (43)$$

где
$$\begin{cases} e_{11} = 1 + (\cos(\mathrm{arctg}(\Delta W_p / W_p)) - \cos(\mathrm{arctg}(\Delta W / W))); \\ e_{22} = 1 + (\sin(\mathrm{arctg}(\Delta W_p / W_p)) - \sin(\mathrm{arctg}(\Delta W / W))); \\ e_{33} = 1 + (x_p - \exp((\ln(W_0 / W)) / \beta)),\ \beta \in [0{,}5;\ 2{,}0]; \end{cases}$$

W_0 и β – параметры двумерного рангового распределения.

Итак, предположим, в определенном интервале наблюдения у нас заданы координаты эмпирических точек, соответствующих объектам в ранговом топологическом пространстве. Однако все точки лежат в различных секущих плоскостях, каждая из которых имеет свой дифлекс-угол. В этом случае с помощью тензора (43) не составит труда получить координаты теоретических точек, соответствующих объектам на фиксированном ранговом гиперпараметрическом распределении техноценоза.

Общие аспекты управления в техноценозе

Из категориального осмысления техноценоза следует, что источником количественных сведений о нем выступают объекты, проявляющие с различных сторон свои устойчивые качественные свойства [11]. При этом, во-первых, сами по себе свойства наличествуют объективно, независимо от их субъективного восприятия. Во-вторых, свойства объекта проявляются как бесконечная совокупность свойств отдельных его подсистем, частей, элементов, а также связей между ними. По сути, мы всегда имеем дело с континуумом свойств, часть из которых к настоящему моменту хорошо изучены, а часть недостаточно исследованы или даже пока, на уровне наших нынешних измерительных возможностей, никак себя не проявили либо вообще науке не известны. В-третьих, хорошо изученные свойства объектов всегда имеют общепринятые качественные меры, называемые показателями, каждому из которых, в свою очередь, соответствует выра-

жающая его численно количественная мера – параметр. В-четвертых, в каждой ситуации может быть определена необходимая и достаточная совокупность показателей, имеющих наибольшее значение с точки зрения целевых установок функционирования техноценоза. В-пятых, исходя из цели управления, должна быть выбрана, как минимум, пара комплементарных показателей, обязательно характеризующих как положительный результат, так и затраты, на основе которой будут строиться интегральный показатель, критерий, алгоритм, ограничения и целевая функция (рис. 12).

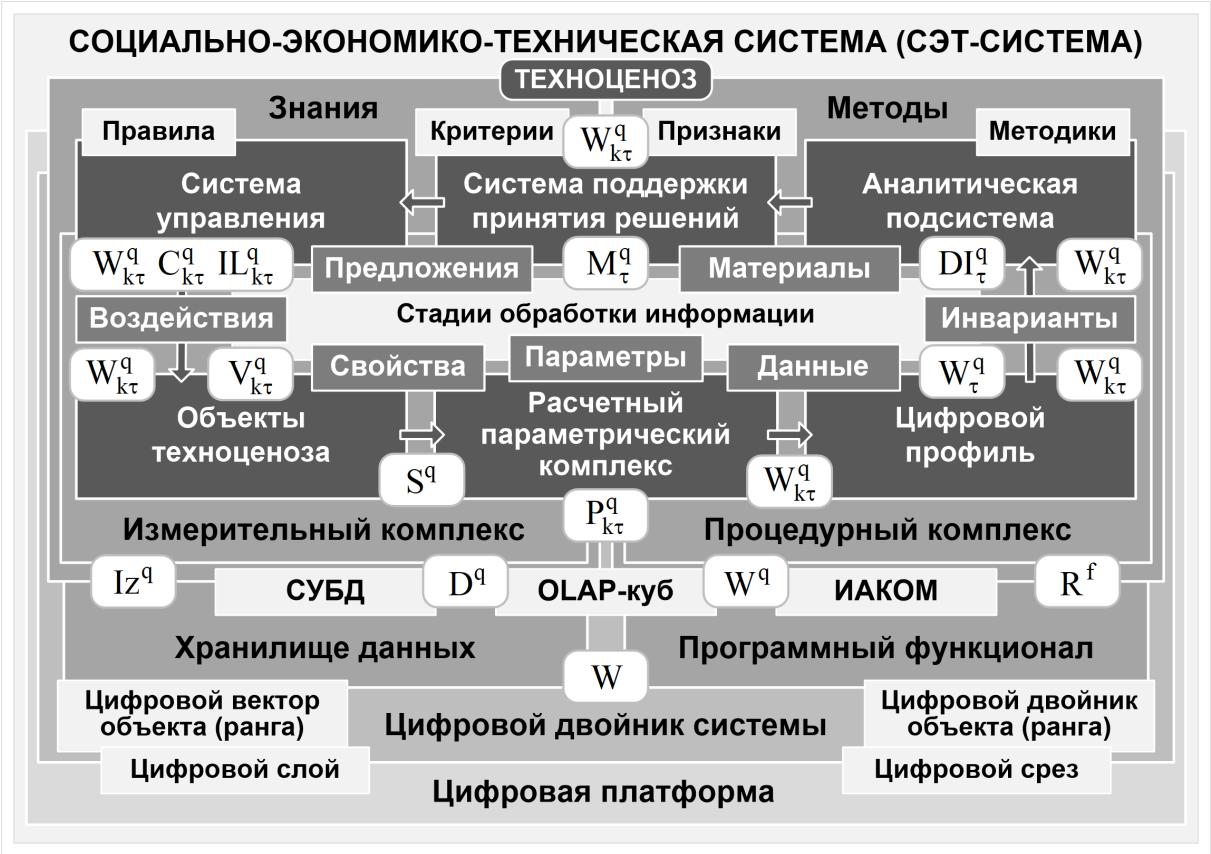


Рис. 12. Стадии обработки информации в процессе управления электропотреблением

Теперь собственно о показателях. Для того чтобы успешно управлять техноценозом, его надо длительное время наблюдать и изучать, а для этого обязательно должен быть создан измерительный комплекс – совокупность средств, методов и вспомогательных устройств, предназначенных для выполнения задач измерения. Работа измерительного комплекса, основанная на современных инструментальных средствах и системах хранения информации, позволяет в режиме реального времени собирать и параметризировать сведения о свойствах системы. При этом абстрактным понятиям «свойство» и «показатель» ставится в соответствие конкретный количественный параметр. Запишем это соответствие аналитически (рис. 12):

$$\left\{S_{k\tau}^{q}\right\} \xrightarrow[Iz^{q}]{} \left\{P_{k\tau}^{q}\right\}, \tag{44}$$

где $\{S_{k\tau}^{q}\}$ – множество q-ых показателей k-го объекта техноценоза, измеряемых на τ-интервале времени;

$\{P_{k\tau}^{q}\}$ – множество q-ых параметров k-го объекта, зафиксированных в результате измерения на τ-интервале времени;

$\{Iz^{q}\}$ – множество средств измерения q-го свойства.

Количественное описание и систематизация сведений позволяют получить численные значения параметров и сформировать базу данных. Именно в этот момент сведения об объектах превращаются в данные:

$$D^{q}\left\langle\left\{P_{k\tau}^{q}\right\}\right\rangle \rightarrow \left\langle\left\{W_{k\tau}^{q}\right\}\right\rangle, \tag{45}$$

где $\left\langle D^{q}\right\rangle$ – база данных q-ых параметров;

$\left\langle W_{k\tau}^{q}\right\rangle$ – кортеж данных q-ых параметров k-го объекта, записанных в базе данных на τ-интервале времени.

Таким образом, жизненный цикл данных начинается тогда, когда осуществляется их полноценная верификация и запись на материальный носитель в форме, пригодной для обработки, хранения, преобразования и передачи. Важно понимать, что база данных техноценоза может строиться только на основе полного охвата всех его объектов, причем на достаточно длительном временном интервале (в сто транзакционных этапов). Затем начинается обработка данных, для чего в системе, помимо измерительного, создается еще и процедурный комплекс – совокупность средств, методов и вычислительных процедур для выполнения расчетных задач (рис. 12):

$$\left\langle\left\{W_{k\tau}^{qpr}\right\}\right\rangle \xrightarrow[\left\langle R_{\tau}^{f}\right\rangle]{} \left\langle\left\{W_{k\tau}^{qse}\right\}\right\rangle, \tag{46}$$

где $\left\langle W_{k\tau}^{qpr}\right\rangle$ – кортеж данных q-ых первичных параметров k-го объекта техноценоза на τ-интервале времени;

$\left\langle W_{k\tau}^{qse}\right\rangle$ – кортеж данных q-ых вторичных параметров k-го объекта техноценоза на τ-интервале времени;

$\left\langle R_{\tau}^{f}\right\rangle$ – кортеж f-элементов программного функционала, участвующих в преобразовании на τ-интервале.

В итоге, обработка первичных данных, полученных в процессе измерения, позволяет получить все необходимые вторичные данные, которые затем используются в процессе управления и замыкают жизненный цикл.

Говоря об изучении техноценоза в целом, в реальности мы имеем дело с его отдельными объектами. Объекты техноценоза обладают совокупностью свойств, каждое из которых численно характеризуется параметром, который может быть измерен с помощью средств, входящих в измерительный комплекс. Важно учитывать, что именно объекты выступают носителями как индивидуальных, так и системных свойств, параметры которых, как правило, не могут по отдельности быть зафиксированы в процессе измерения. Для этого требуется последующая аналитическая обработка.

По результатам измерения формируется расчетный параметрический комплекс, где содержатся данные, обработка которых производится в рамках цифрового профиля с помощью программного функционала, входящего в процедурный комплекс. Цель работы с данными – получение детерминированных инвариантов, поступающих в аналитическую подсистему и далее – с материалами в СППР, которая вырабатывает предложения подсистеме управления по формированию управляющих воздействий [11].

Итак, в процессе решения задачи управления измеренные данные обрабатываются известными методами на основании имеющихся знаний, а затем полученные материалы анализируются (также с помощью имеющихся методов и знаний). На основании анализа материалов предлагаются допустимые решения, и в результате выбора принимается наилучшее. Результаты этого решения применяются в управлении и, вне зависимости от степени успешности, пополняют информацию, знания и методы.

Часть данных, на основе которых вырабатывается информация, могут быть параметризированы, т.е. представлены в форме множества параметров. Параметризированные данные всегда, в той или иной степени, носят стохастический характер, т.е. являются случайными величинами. Однако, информация, получаемая в результате обработки данных и предназначенная для принятия решений, должна быть строго детерминированной. Таким образом, основной задачей обработки стохастических данных является получение детерминированных инвариантов, пригодных для использования в качестве информации в процессе принятия решений [11].

В нашей классификации стохастические данные могут быть трех видов: невзаимосвязанные, гауссовые и негауссовые. Невзаимосвязанные – это данные, как правило, не принадлежащие одной генеральной совокупности. Поэтому они вообще не предполагают возможности получения детерминированных инвариантов и не могут использоваться при выработке информации для принятия решений. Итак, первой обязательной процедурой, реализуемой в процессе подготовки данных, является их проверка на взаимосвязанность. Гауссовые – это данные, на которых работают центральные предельные теоремы и закон больших чисел. В качестве детер-

минированных инвариантов, используемых при выработке информации для принятия решений, в данном случае применяются первый и второй моменты (среднее и стандарт), получаемые в результате статистической обработки выборок данных. В пределе, после подтверждения гипотезы о форме закона распределения, может быть получена информация о теоретических значениях математического ожидания и дисперсии [2,9-11].

Негауссовые – это взаимосвязанные данные, на которых не работают центральные предельные теоремы и закон больших чисел. Следовательно, второй обязательной процедурой, реализуемой при подготовке данных, является их проверка на негауссовость. Суть проверки сводится к следующему. Из «генеральной совокупности» имеющихся данных делается выборка, на которой определяются среднее и стандарт. Затем к этой выборке прибавляется часть данных, взятых из «генеральной совокупности», и снова определяются среднее и стандарт. Подобная процедура наращивания выборки продолжается до полного исчерпания «генеральной совокупности». Далее строится нормированная зависимость значений среднего и стандарта от объема выборки. При этом если зависимость имеет выраженную (с учетом определенных критериев) тенденцию к стабилизации, то данные относятся к виду гауссовых. Если же обнаруживается устойчивый рост зависимости, то они считаются негауссовыми. На негауссовых выборках данных поиск детерминированных инвариантов, пригодных для выработки информации, применяемой в процессе принятия решений, осуществляется методами рангового анализа. И здесь в качестве инвариантов используются параметры формы кривых ранговых параметрических распределений, построенных по имеющимся расчетным данным [2,9]:

$$\left\langle \left\{ W_\tau^q \right\} \right\rangle \xrightarrow[\left\langle R_\tau^f \right\rangle]{} \left\langle \left\{ DI_\tau^q \right\} \right\rangle, \tag{47}$$

где $\left\langle W_\tau^q \right\rangle$ – кортеж задействованных данных q-ых параметров техноценоза на τ-интервале времени;

$\left\langle DI_\tau^q \right\rangle$ – кортеж детерминированных инвариантов q-ых параметров техноценоза на τ-интервале времени;

$\left\langle R_\tau^f \right\rangle$ – кортеж f-элементов программного функционала, участвующих в получении инвариантов.

На основе детерминированных инвариантов в аналитической подсистеме техноценоза разрабатываются материалы для СППР (рис. 12):

$$\left\langle \left\{ W_\tau^q \right\}, \left\{ DI_\tau^q \right\} \right\rangle \xrightarrow[\left\langle R_\tau^f \right\rangle]{} \left\langle \left\{ M_\tau^q \right\} \right\rangle, \tag{48}$$

где $\langle M_\tau^q \rangle$ – кортеж материалов, разрабатываемых аналитической подсистемой техноценоза на τ-интервале времени;

$\langle R_\tau^f \rangle$ – кортеж f-элементов программного функционала, участвующих в получении материалов на τ-интервале.

Материалы, получаемые СППР из аналитической подсистемы, позволяют выработать предложения для системы управления техноценоза, которая на их основе формирует распоряжения, передаваемые объектам:

$$\langle \{M_\tau^q\} \rangle \xrightarrow[\langle R_\tau^f \rangle]{} \langle [\overline{W}_{k\tau}^q], [\overline{C}_{k\tau}^q], [IL_{k\tau}^q] \rangle \to \langle [V_{k\tau}^q] \rangle, \qquad (49)$$

где $[\overline{W}_{k\tau}^q]$ – формализованные предложения, касающиеся рекомендуемых значений q-го параметра, разрабатываемые СППР техноценоза по k-му объекту на τ-интервале;

$[\overline{C}_{k\tau}^q]$ – формализованные предложения, касающиеся рекомендуемых стимулирующих затрат по q-параметру, разрабатываемые СППР по k-му объекту на τ-интервале;

$[IL_{k\tau}^q]$ – формализованные данные мониторинга результативности предыдущих управленческих процедур, касающиеся q-го параметра, разрабатываемые СППР техноценоза по k-му объекту на τ-интервале;

$[V_{k\tau}^q]$ – распоряжения по q-му параметру со стороны системы управления техноценоза k-му объекту на τ-интервале.

Как видно из рисунка 12, функционал измерительного и процедурного комплексов предлагается реализовывать на цифровой платформе, в основе которой лежит параметрический цифровой двойник техноценоза:

$$\langle W \rangle \leftrightarrow \langle \langle W^q \rangle, \langle R^f \rangle, \langle DI^q \rangle, \langle M^q \rangle \rangle, \qquad (50)$$

где $\langle W \rangle$ – однопараметрический цифровой двойник техноценоза;

$\langle W^q \rangle$ – хранилище данных техноценоза по q-параметру;

$\langle R^f \rangle$ – полный программный функционал техноценоза;

$\langle DI^q \rangle$ – хранилище детерминированных инвариантов;

$\langle M^q \rangle$ – хранилище материалов системы управления.

Вообще, применение подходов, связанных с цифровизацией и цифровым двойником, в управлении техноценозом объясняется необходимостью в режиме реального времени автоматически осуществлять сложнейшие расчеты, целью которых является следующее. Необходимо на основе актуальных параметрических данных, содержащихся в расчетном параметрическом комплексе, постоянно получать детерминированные инварианты, которые поступают в аналитическую подсистему, затем в СППР и далее – в подсистему управления. При этом важно в пределах одной вычислительной транзакции содержать в контуре управления только необходимую часть OLAP-куба данных и элементы программного функционала, непосредственно задействованные в расчетах. Это позволяет, с одной стороны, экономить привлекаемые вычислительные ресурсы, а с другой – постоянно иметь в оперативной памяти самые актуальные данные и наиболее востребованные элементы программного функционала. Подобная задача решается с помощью, так называемой, цифровой профилизации, которая нацелена на создание и поддержание в актуальном состоянии хранилища данных техноценоза. При этом используется понятие цифрового профиля, реализуемого на OLAP-кубе данных с помощью процедурного комплекса рангового анализа. Фактически цифровой профиль представляет собой получаемую посредством OLAP-технологий взаимосвязанную совокупность данных, принадлежащих различным элементам OLAP-куба и их произвольным комбинациям, а также всего программного функционала, задействованного в текущей транзакции [9,10]. Запишем аналитически:

$$\left\langle W_{\tau}^{q} \right\rangle \leftrightarrow \left\langle \left\langle W_{k\tau}^{OLAP} \right\rangle, \left\langle R_{\tau}^{f} \right\rangle \right\rangle, \tag{51}$$

где $\left\langle W_{\tau}^{q} \right\rangle$ – цифровой профиль по q-параметру на τ-интервале;

$\left\langle W_{k\tau}^{OLAP} \right\rangle$ – кортеж данных OLAP-куба, задействованных для формирования цифрового профиля на τ-интервале;

$\left\langle R_{\tau}^{f} \right\rangle$ – кортеж f-элементов программного функционала, задействованных для формирования цифрового профиля техноценоза на τ-интервале.

Как представляется, основная теоретическая проблема формирования методологии управления техноценозами является следствием того, что эти системы проявляют себя как фракталоподобные дисконтинуальные среды, генерирующие негауссовые выборки данных. Подобные выборки хорошо представимы числовыми функциями ранговых распределений, поиск устойчивых параметров которых сводится к отысканию аппроксимационных форм в ранговых топологических пространствах. Практическая проблема, связанная с «ненаблюдаемостью» техноценозов, порождается

тем, что, при работе с данными, невозможно обеспечить одновременность измерения, достаточную однородность дискретизации, корректное определение горизонта, а также квазипараллельное разделение потоков.

В процессе мониторинга свойств объектов техноценоза мы имеем дело с устойчивыми негауссовыми распределениями случайных величин, которые корректно обрабатываются методами рангового анализа, основанными на уравнениях закона оптимального построения техноценозов [2,9]. Важно учитывать, что для получения любого параметра необходимо задействовать все хранилище данных, а это, в свою очередь, требует формирования цифрового двойника, виртуализации и OLAP-кубирования. Известно, что применение параметрического цифрового двойника позволяет существенно повысить качество на всех этапах процесса управления и создает предпосылки для формирования цифровой платформы.

Управление электропотреблением объектов техноценоза

Рассмотрев общие аспекты управления в техноценозах (рис. 12) перейдем к управлению электропотреблением. Как известно, объекты техноценоза, будучи включены в электрическую цепь энергосистемы, обладают фундаментальным свойством преобразовывать электромагнитную энергию в другие виды энергии. Это свойство принято характеризовать таким показателем, как электропотребление, которое, в свою очередь, количественно оценивается с помощью параметра, который называется дифференциальным электропотреблением (далее – просто электропотреблением), измеряемым в киловатт-часах за временной интервал (кВт·ч\Т). Электропотребление (как параметр) может быть измерено с помощью счетчиков электроэнергии, входящих в измерительный комплекс. По результатам измерения формируются расчетный параметрический комплекс, хранилище данных и цифровой двойник, где содержатся данные по электропотреблению, обработка которых производится в рамках цифрового профиля с помощью программного функционала рангового анализа, входящего в процедурный комплекс. Хранилище данных по электропотреблению формируется в виде OLAP-куба $\left\langle W_{k\tau}^{OLAP} \right\rangle$ (W – параметр куба, k – номер объекта, τ – номер временного интервала), где в качестве слоев размещаются данные, полученные по результатам реализации процедур рангового анализа [2,9].

Цель работы с данными – получение детерминированных инвариантов, поступающих в аналитическую подсистему и далее – с материалами в СППР, которая вырабатывает предложения подсистеме управления по формированию управляющих воздействий. В качестве детерминированных инвариантов в процессе управления электропотреблением рассматриваются полученные на основе обработки ранговых гиперпараметрических распределений техноценоза значения дифлекс-угла, тангенс-фактора и ранго-

вой топологической меры. При этом изначально берется OLAP-куб, сформированный, как правило, за 10 – 12 лет предыстории техноценоза, и формируется ZP-матрица $\{A, \Delta, X\}$ (A – множество дифлекс-углов, Δ – множество тангенс-факторов, X – множество ранговых топологических мер).

На основе ZP-матрицы по результатам реализации процесса управления в качестве материалов и предложений, поступающих из аналитической подсистемы и СППР в систему управления техноценоза, разрабатывается ZP-план энергосбережения, который представляет собой группу слоев OLAP-куба $\left\langle W_{k\tau}^{KL} \right\rangle$, содержащих следующую информацию:

$W_{k\tau}^{PL}$ – объем снижения электропотребления k-го объекта из расчета на один временной τ-интервал;

W_{τ}^{PL} – суммарный объем снижения электропотребления техноценоза на τ-интервале управленческого процесса;

$C_{k\tau}^{PL}$ – объем средств (в денежном выражении), выручаемых за счет экономии электроэнергии k-ым объектом на τ-интервале;

$\overline{C}_{k\tau}^{PR}$ – размер премии персоналу k-го объекта техноценоза за успехи в экономии электроэнергии на τ-интервале;

$\overline{C}_{k\tau}^{IN}$ – объем инвестиций в энергосбережение k-го объекта (перевооружение и модернизацию оборудования) на τ-интервале;

$B_{k\tau}^{IL}$ – расчетный коэффициент конверсии k-го объекта техноценоза на τ-интервале (безразмерная величина);

$IL_{k\tau+1}$ – параметр конверсии k-го объекта, зафиксированный на (τ+1)-интервале (измеряется в кВт·ч\Т на денежную единицу);

$IL_{\Sigma\tau+1}$ – совокупный параметр конверсии техноценоза, взятого в целом на (τ+1)-интервале (кВт·ч\Т на денежную единицу).

Рассмотрим процедурный комплекс управления электропотреблением техноценоза более подробно. Итак, в рамках общей процедуры ZP-анализа после формирования ZP-матрицы предполагается реализация этапов ZP-нормирования и ZP-планирования, основными задачами которых являются выбор стратегии управления электропотреблением, а также разработка ZP-плана энергосбережения, включая материалы для осуществления мониторинга результативности управленческого процесса [4,9,10].

Процедура ZP-планирования может иметь различные стратегии, однако, для реализации любой из них требуется разработка ZP-плана энергосбережения, который предполагает предъявление каждому объекту техноценоза на каждом временном интервале индивидуальной нормы снижения электропотребления. Методика разработки плана общая для обеих стратегий и основывается на том, что доля объекта в общем объеме снижения электропотребления должна быть пропорциональна доле его электропотребления в общем электропотреблении техноценоза до момента реализации ZP-плана (на текущий временной интервал). Следовательно, объем

снижения электропотребления k-го объекта может быть определен следующим образом (из расчета на один временной интервал):

$$W_k^{PL} = \frac{W(x_k) \cdot W^{PL}}{\int_0^{\infty} W(x)dr}, \tag{52}$$

где W^{PL} – величина, на которую в течение каждого временного интервала расчетного промежутка времени должно снижаться суммарное электропотребление;

$W(x_k)$ – текущее значение электропотребления k-го объекта;

$W(x)$ – аппроксимационная кривая, полученная для эмпирических значений электропотребления объектов на начальном этапе внедрения методики оптимального управления электропотреблением техноценоза.

В соответствии с принципом оптимальности норма ежегодного снижения электропотребления объекта должна быть поставлена в зависимость от степени близости текущего электропотребления объекта к нижней границе области допустимых значений техноценоза, получаемой по итогам ZP-нормирования. Решать задачу определения нормы предлагается с помощью весовых коэффициентов, получению которых предшествует расчет для каждого объекта техноценоза ключевого дифлекс-параметра – относительного отклонения текущего значения электропотребления от величины, соответствующей его рангу на нижней границе области допустимых значений. Расчет ведется для всех объектов техноценоза по отдельности на каждом временном интервале, где для k-го объекта имеем:

$$W_{k\tau}^{O} = \frac{\left|W(x_k) - W^{H}(x_k)\right|}{W(x_k)}, \tag{53}$$

где $W_{k\tau}^{O}$ – относительное отклонение значения электропотребления k-го объекта от величины, соответствующей его рангу на нижней границе области допустимых значений, получаемой по итогам ZP-нормирования;

$W^{H}(x_k)$ – значение электропотребления k-го объекта на нижней границе области допустимых значений техноценоза, получаемой по итогам ZP-нормирования.

Это позволяет для k-го объекта рассчитать весовой коэффициент:

$$\begin{cases} B_k^{PL} = \dfrac{W_{k\tau}^{O}}{\sum\limits_{j=1}^{n} W_{k\tau j}^{O}}; \\ \sum\limits_{k=1}^{n} B_k^{PL} = 1, \end{cases} \tag{54}$$

где B_k^{PL} – весовой коэффициент, рассчитанный для k-го объекта;
n – общее количество объектов в техноценозе.

В итоге, с учетом полученных весовых коэффициентов, индивидуальная норма снижения электропотребления k-го объекта (из расчета на один временной интервал) должна быть скорректирована:

$$\overline{W}_k^{PL} = W_k^{PL} + W_k^{PL} \cdot (B_k^{PL} - 0{,}5). \tag{55}$$

Смысл корректировки, при этом, заключается в следующем. Значение индивидуальной нормы снижения электропотребления рассматривается как центрированная величина, относительно которой в меньшую или большую сторону, в зависимости от весового коэффициента, осуществляется изменение. Диапазон данного изменения равен самой величине индивидуальной нормы снижения электропотребления, а точное значение скорректированной нормы определяется на основе прибавления (если весовой коэффициент больше 0,5) или вычитания (если меньше 0,5) числа, равного произведению нормы на сам весовой коэффициент.

С целью гарантированного выполнения ZP-плана предлагается ввести систему поощрения объектов техноценоза за успехи в экономии электроэнергии и для этого создать план премирования и инвестиций, методика разработки которого также является общей для любых стратегий ZP-планирования, а средства в него поступают из так называемого фонда энергосбережения. Источником для формирования фонда выступают средства, выручаемые за счет экономии электроэнергии объектами:

$$C_k^{PL} = \overline{W}_k^{PL} \cdot sc(x_k), \tag{56}$$

где C_k^{PL} – объем средств (в денежном выражении), выручаемых за счет экономии электроэнергии k-ым объектом;
$sc(x_k)$ – тариф на электроэнергию, предъявляемый k-му объекту.

Как представляется, поощрительная премия, выплачиваемая объекту за успешную экономию электроэнергии, в соответствии с принципом оптимальности, также должна быть поставлена в зависимость от степени близости электропотребления объекта к нижней границе области допустимых значений техноценоза, получаемой по итогам ZP-нормирования. Решать задачу определения премии предлагается с помощью весовых коэффициентов, расчет которых осуществляется по методике, отличающейся от (54). Дело в том, что при определении нормы снижения электропотребления мы полагали, что чем меньше значение дифлекс-параметра, тем должна быть и меньше норма. А в случае расчета премии – все наоборот, чем меньше значение дифлекс-параметра, тем премия должна быть больше. Итак, для k-го объекта в данном случае весовой коэффициент равен:

$$\begin{cases} B_k^{PR} = G_k / \sum_{i=1}^{n} G_{ki}; \\ G_k = 1 - W_{k\tau}^{O} / \sum_{i=1}^{n} W_{k\tau i}^{O}; \\ \sum_{k=1}^{n} B_k^{PR} = 1, \end{cases} \tag{57}$$

где B_k^{PR} – весовой коэффициент, рассчитанный для k-го объекта по завершении τ-этапа управленческого процесса;
G – вспомогательная переменная;
i – формальный индекс суммирования.

Индивидуальная доля премирования объекта техноценоза зависит от рассчитанного по выражению (57) весового коэффициента и состоит из двух слагаемых, первое из которых определяет размер премии персоналу за успехи в экономии электроэнергии, а второе – объем инвестиций в энергосбережение (перевооружение и модернизацию электрооборудования):

$$\begin{cases} \overline{C}_k^{PR} = \gamma_1 \cdot (C_k^{PL} + C_k^{PL} \cdot (B_k^{PR} - 0,5)); \\ \overline{C}_k^{IN} = \gamma_2 \cdot (C_k^{PL} + C_k^{PL} \cdot (B_k^{PR} - 0,5)); \\ 0 \le (\gamma_1 + \gamma_2) \le 1, \end{cases} \tag{58}$$

где $\overline{C}_k^{PR}$ – размер премии персоналу объекта техноценоза за успехи в экономии электроэнергии;
$\overline{C}_k^{IN}$ – объем инвестиций в энергосбережение (перевооружение и модернизацию электрооборудования объекта);

γ_1, γ_2 – коэффициенты, учитывающие установленную в системе управления техноценоза долю отчислений от сэкономленных средств в фонд энергосбережения (как правило, находятся в диапазоне от 0,2 до 0,3 каждый).

В итоге для каждого k-го объекта техноценоза получаем индивидуальную совокупную долю премирования в общем фонде энергосбережения техноценоза (из расчета на один временной интервал):

$$\overline{C}_k^{PL} = \overline{C}_k^{PR} + \overline{C}_k^{IN}. \tag{59}$$

Небольшой небаланс в текущем временном интервале, который может возникнуть в процессе применения выражений (55) и (59), будет скорректирован на следующем временном интервале. Кроме того, следует отметить, что при долгосрочном применении процедуры ZP-анализа, на каждом временном интервале по мере движения объектов к нижней границе области допустимых значений техноценоза будет постоянно происходить пересчет весовых коэффициентов и, соответственно, перераспределение премиальных средств в пользу тех объектов, которые на данный момент достигнут более значительных успехов в деле экономии электроэнергии.

Различие в стратегиях ZP-планирования сводится к методике расчета величины, на которую в течение каждого временного интервала расчетного промежутка времени должно снижаться суммарное электропотребление техноценоза. Для первой стратегии – достижения к заданному временному интервалу требуемого уровня снижения электропотребления техноценоза – выражение для расчета выглядит следующим образом [4,9]:

$$W^{PL} = \frac{K^{PL} \cdot \int_0^{\infty} W(x)dx}{100 \cdot T}, \tag{60}$$

где K^{PL} – плановый коэффициент – задаваемая в процентах норма снижения электропотребления техноценоза;

T – время реализации планового коэффициента, задаваемое в количестве временных интервалов, за которые должна быть достигнута заложенная норма.

Вторая стратегия процедуры ZP-планирования состоит в достижении техноценозом уровня Z1 или Z2-потенциала энергосбережения к заданному временному интервалу. При данной стратегии суммарное электропотребление рассчитывается следующим образом [4,9]:

$$W^{PL} = \frac{\int_0^{\infty} W(x)dr - \int_0^{\infty} W^{H}(x)dr}{T}, \qquad (61)$$

где $W(x)$ – аппроксимированное ранговое параметрическое распределение техноценоза по электропотреблению;

$W^{H}(x)$ – нижняя граница области допустимых значений техноценоза, получаемой по итогам ZP-нормирования (при необходимости может быть использована граница, рассчитанная для Z1 или Z2-потенциала);

T – в данном случае – время достижения техноценозом потенциала энергосбережения требуемого уровня.

Важным элементом ZP-анализа является мониторинг результативности процесса энергосбережения, который предлагается осуществлять с помощью показателя конверсии. Данный показатель позволяет оценить, насколько адекватно премиальные средства, определенные по итогам процедуры ZP-планирования и вложенные в объект на предыдущем временном интервале, конвертировались (преобразовались, воплотились, превратились, реализовались, отразились) в фактическое снижение электропотребления на последующем временном интервале. Очевидно, что параметр конверсии может быть рассчитан только по итогам двух и более временных интервалов реализации ZP-анализа. Для k-го объекта он равен:

$$IL_{k\tau} = \frac{W_{k\tau} - W_{k\tau+1}}{\overline{C}_{k\tau}^{PL}}, \qquad (62)$$

где $IL_{k\tau+1}$ – параметр конверсии k-го объекта техноценоза, зафиксированный на (τ+1)-интервале (измеряется в кВт·ч\Т на денежную единицу);

$W_{k\tau}$ – электропотребление k-го объекта на τ-интервале;

$W_{k\tau+1}$ – электропотребление k-го объекта на (τ+1)-интервале;

$\overline{C}_{k\tau}^{PL}$ – объем премиальных средств, определенных при ZP-планировании и вложенных в объект на τ -интервале.

Соотнесение параметра конверсии выделенного k-го объекта с суммой данных параметров для всех объектов техноценоза позволяет получить коэффициент конверсии, имеющий смысл весового коэффициента (рассчитывается отдельно для каждого временного интервала):

$$B_{k\tau}^{IL} = \frac{IL_{k\tau}}{\sum_{i=1}^{n} IL_{i\tau}}, \tag{63}$$

где $B_{k\tau}^{IL}$ – расчетный коэффициент конверсии k-го объекта техноценоза на τ-временном интервале;

$IL_{k\tau}$ – параметр конверсии k-го объекта на τ-ом интервале;

n – общее количество объектов техноценоза.

В процедуре ZP-планирования коэффициент конверсии может быть использован вместо или совместно с коэффициентами, рассчитываемыми по выражениям (54) и (57). При этом в (55) и (58) будут применяться несколько видоизмененные весовые коэффициенты вида:

$$\begin{cases} \overline{B}_k^{PL} = \xi_1 \cdot B_k^{PL} + \xi_2 \cdot B_k^{IL}; \\ \overline{B}_k^{PR} = \xi_3 \cdot B_k^{PR} + \xi_4 \cdot B_k^{IL}; \\ \xi_1 + \xi_2 = 1;\ \xi_3 + \xi_4 = 1, \end{cases} \tag{64}$$

где $\begin{Bmatrix} \xi_1 & \xi_2 \\ \xi_3 & \xi_4 \end{Bmatrix}$ – матрица весов, применяемая при пересчете весовых коэффициентов B_k^{PL} и B_k^{PR} (определяются, как правило, на основе априорной экспертной информации).

Параметр конверсии может быть рассчитан и для техноценоза, будучи взятого в целом. При этом на (τ+1)-интервале будем иметь:

$$IL_{\Sigma\tau+1} = \frac{\int_0^{\infty} W^{\tau}(x)dx - \int_0^{\infty} W^{\tau+1}(x)dx}{\sum_{k=1}^{n} (\overline{C}_{k\tau}^{PR} + \overline{C}_{k\tau}^{IN})}, \tag{65}$$

где $IL_{\Sigma\tau+1}$ – совокупный параметр конверсии техноценоза в целом на (τ+1)-интервале (кВт·ч\Т на денежную единицу);

$W^{\tau}(x)$ – аппроксимированное ранговое параметрическое распределение техноценоза на τ-интервале;

$W^{\tau+1}(x)$ – ранговое распределение на (τ+1)-интервале;

$\overline{C}_{k\tau}^{PR}$ – объем средств, израсходованных на премии персоналу k-ого объекта на τ-интервале;

$\overline{C}_{k\tau}^{IN}$ – объем средств, инвестированных в модернизацию и перевооружение электрооборудования k-ого объекта техноценоза на τ-интервале.

Совокупный параметр конверсии техноценоза может применяться в любых стратегиях ZP-планирования, связанных с экономическими ограничениями, в частности – по конвертируемости средств, вкладываемых в энергосбережение. При данных стратегиях величина, на которую в течение каждого временного интервала должно снижаться суммарное электропотребление техноценоза, рассчитывается по выражениям, аналогичным (60) или (61). Однако в процессе реализации стратегии на каждом временном интервале дополнительно осуществляется мониторинг конверсии. При этом циклический процесс ZP-анализа завершается при достижении показателем конверсии априорно заданного минимального уровня [4,9].

Алгоритм управления электропотреблением

Рассмотрев детально методологию ZP-планирования, перейдем к алгоритму реализации управленческого процесса (рис. 13). На первом этапе предполагается извлечение данных из OLAP-куба цифрового двойника техноценоза по электропотреблению $\left\langle W_{k\tau}^{OLAP} \right\rangle$, где W – соответствующий параметр куба, k – номер объекта, τ – номер временного интервала [10]. Следует иметь в виду, что на этом этапе мы берем OLAP-куб данных, сформированный на предыдущих этапах управленческого процесса (как правило, глубиной в 10 – 12 лет предыстории). Формируется исходная ZP-матрица {A,Δ,X}, где A – множество дифлекс-углов, Δ – множество тангенс-факторов, X – множество ранговых топологических мер.

На втором этапе алгоритма (рис. 13) на оси времени t задаются начальная и конечная точки τ^b и τ^e, определяются начальные моменты промежуточных этапов, начиная с первого: τ^1, τ^2, τ^3, τ^4, τ^i и т.д. Разбиение траектории на этапы делается, как правило, равномерным. Оно соответствует цикличности общего планирования в техноценозе, а также привязывается к периодам поступления данных по электропотреблению со счетчиков электроэнергии. В данном случае, для упрощения картины заданы всего пять этапов, по которым в рамках планирования сформирована первоначальная линейная траектория управленческого процесса – прямая, соединяющая начальную точку $b(\alpha^b,\tau^b)$ с конечной $e(\alpha^e,\tau^e)$ (рис. 14). Вспомним, что, как показано в работе [3], подобная траектория соответствует наиболее эффективной (по соотношению «дифлекс-параметр – дифференциальное электропотребление» или «полезный эффект – затраты») форме операционной (производственной) функции управления в техноценозе.

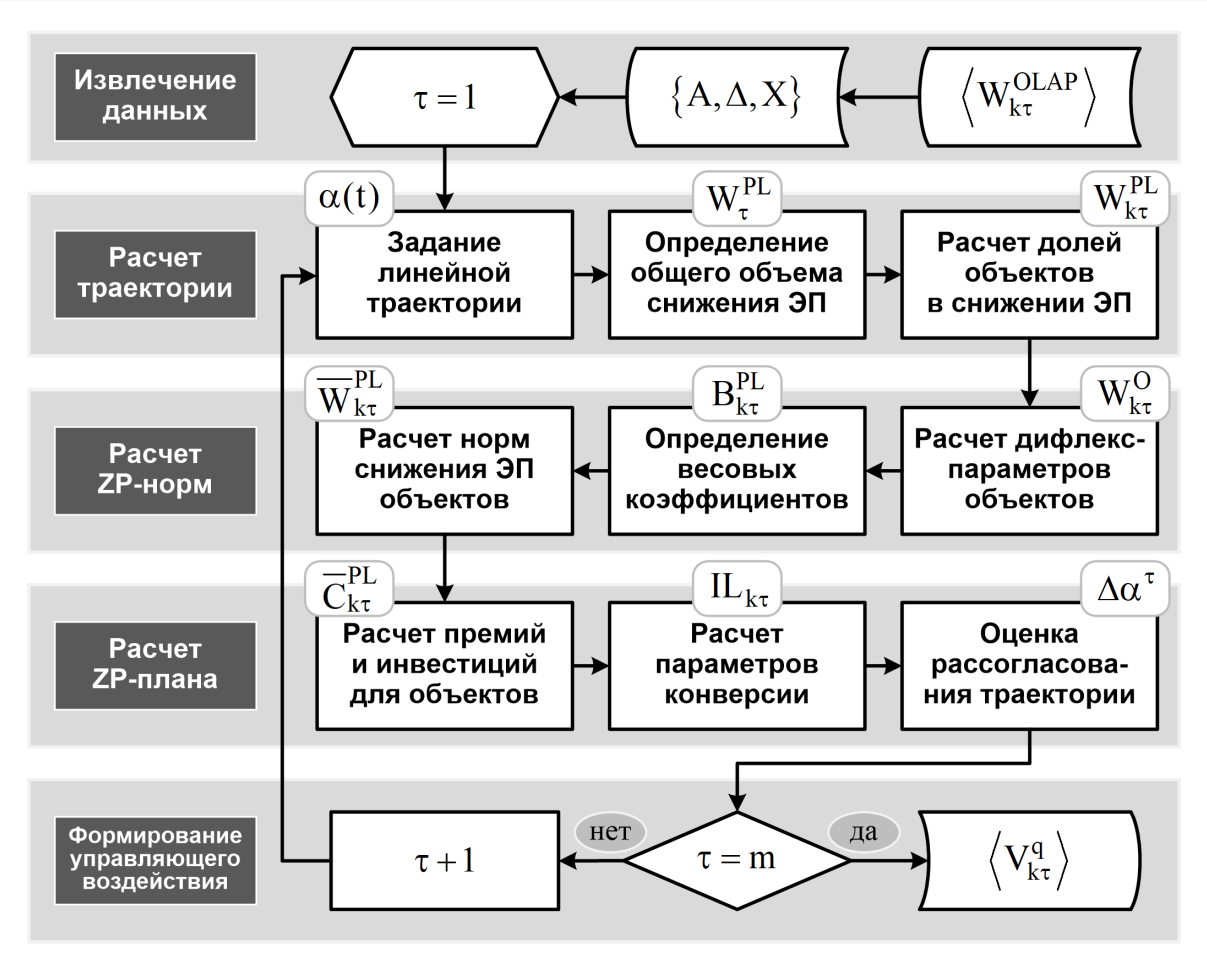


Рис. 13. Схема процесса управления электропотреблением техноценоза на основе процедур ZP-анализа

Задание начальной линейной траектории процесса управления электропотреблением техноценоза $\alpha(t)$ осуществляется по известным координатам начальной $b(\alpha^b,\tau^b)$ и конечной $e(\alpha^e,\tau^e)$ точек с помощью канонического уравнения прямой, которое можно представить следующим образом:

$$\frac{t-\tau^b}{\tau^e-\tau^b}=\frac{\alpha-\alpha^b}{\alpha^e-\alpha^b}, \tag{66}$$

где τ^b и τ^e – соответственно, моменты времени начала и конца формируемой траектории управленческого процесса;

α^b и α^e – начальное и конечное значения дифлекс-углов, определяющих положение начального и конечного ранговых гиперпараметрических распределений на ранговой гиперпараметрической поверхности техноценоза.

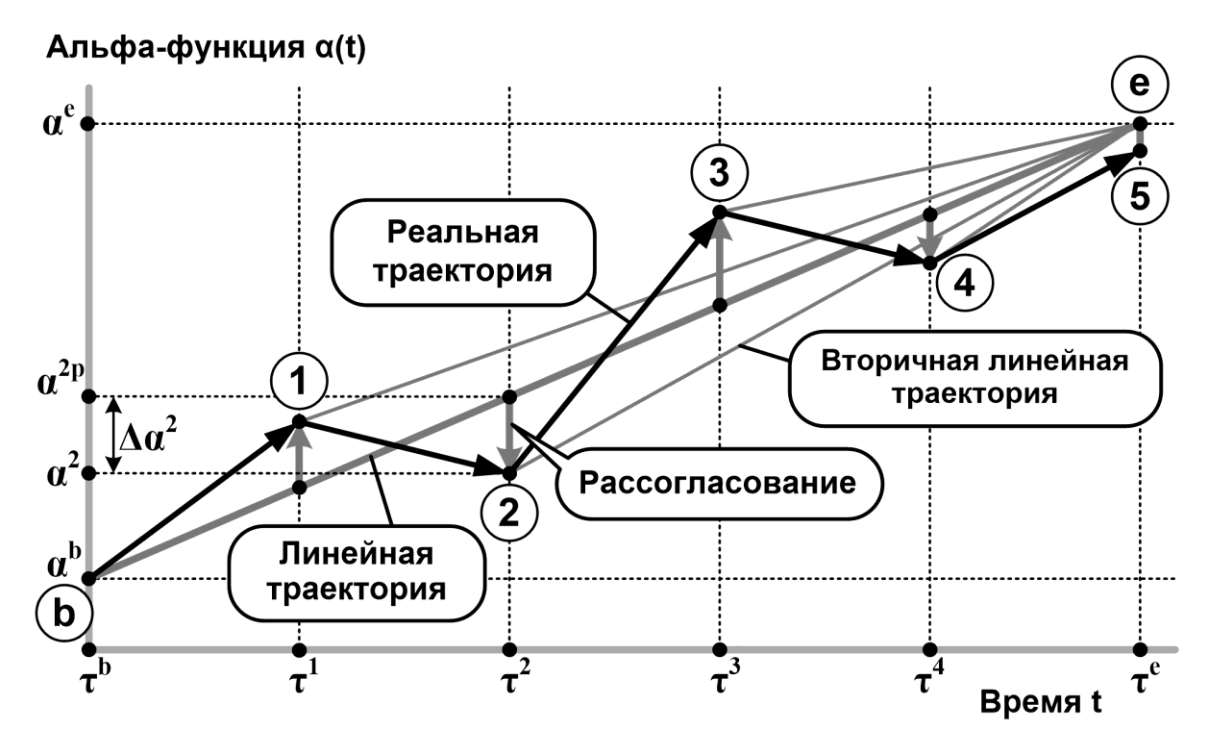


Рис. 14. Линейная траектория процесса управления электропотреблением техноценоза α(t): b – точка начала; e – точка завершения

Теперь вернемся к алгоритму реализации процесса управления электропотреблением, изображенному на рисунке 13. По окончании очередного этапа (за исключением заключительного) выполняется корректировка управленческой траектории. При этом с учетом полученного угла рассогласования (о нем будет подробнее сказано несколько ниже) осуществляется построение вторичной линейной траектории, которая соединяет фактическую текущую точку с конечной. Вторичные траектории на рисунке 13 показаны прямыми, соединяющими точки 1, 2, 3 и 4 с точкой «e».

Задание вторичной i-ой линейной траектории процесса управления электропотреблением техноценоза $\alpha^i(t)$ осуществляется по известным координатам начальной точки i-го этапа $s^i(\alpha^i,\tau^i)$ и конечной точки всего процесса управления $e(\alpha^e,\tau^e)$ с помощью уравнения, аналогичного (66):

$$\frac{t-\tau^i}{\tau^e-\tau^i}=\frac{\alpha-\alpha^i}{\alpha^e-\alpha^i}, \qquad (67)$$

где i – номер этапа процесса управления, i = 1, 2, 3,… (следует учитывать, что начальная, обозначенная буквой «b», и конечная «e» точки в данном случае не индексируются).

Очевидно, что первичную и вторичную траектории процесса управления можно, в зависимости от условий расчетов, задать с помощью линейной альфа-функции α(t) с угловым коэффициентом. При этом:

$$\begin{cases} \alpha(t) = \alpha^{b} + \lambda t; \\ \alpha^{i}(t) = \alpha^{i} + \lambda t, \end{cases} \tag{68}$$

где $\lambda = \left(\dfrac{\alpha^{e} - \alpha^{b}}{\tau^{e} - \tau^{b}} \right)$ – угловой коэффициент.

Учитывая разницу между начальным и конечным значениями дифлекс-углов $\alpha^{\tau-1}$ и α^{τ} по ранговой гиперпараметрической поверхности и данным цифрового двойника определяется общий объем снижения электропотребления техноценоза на каждом τ-этапе управленческого процесса:

$$W_{\tau}^{PL} = \int_{0}^{\infty} W(\alpha^{\tau-1}, \delta^{\tau-1}, x)dx - \int_{0}^{\infty} W(\alpha^{\tau}, \delta^{\tau}, x)dx, \tag{69}$$

где W_{τ}^{PL} – общий объем снижения электропотребления техноценоза на τ-этапе управленческого процесса;

$W(\alpha^{\tau-1},\delta^{\tau-1},x)$ – аппроксимированное ранговое гиперпараметрическое распределение на (τ-1)-интервале;

$W(\alpha^{\tau},\delta^{\tau},x)$ – аппроксимированное ранговое гиперпараметрическое распределение на τ-интервале.

Далее по выражению (52) рассчитывается объем снижения электропотребления k-го объекта техноценоза на τ-этапе $W_{k\tau}^{PL}$. Учитывая полученные по (53) значения относительного отклонения текущего значения электропотребления объекта от величины, соответствующей его рангу на нижней границе области допустимых значений $W_{k\tau}^{O}$, по выражению (54) для каждого объекта рассчитывается весовой коэффициент $B_{k\tau}^{PL}$. В итоге, с учетом полученных весовых коэффициентов, по (55) рассчитывается индивидуальная норма снижения электропотребления k-го объекта техноценоза на τ-этапе $\overline{W}_{k\tau}^{PL}$. Кроме того, по выражениям (56) – (59) определяются объемы сэкономленных средств, а также размеры премий и инвестиций для каждого объекта техноценоза на τ-этапе: $C_{k\tau}^{PL}$, $\overline{C}_{k\tau}^{PR}$, $\overline{C}_{k\tau}^{IN}$.

С целью мониторинга результативности процесса управления электропотреблением (рис. 13), начиная со второго этапа, по (62) – (65) рассчи-

тываются параметр и коэффициент конверсии k-го объекта на τ-интервале $IL_{k\tau}$ и $B_{k\tau}^{IL}$, а также совокупный параметр конверсии $IL_{\Sigma\tau}$. На основе результатов расчетов формируется управляющее воздействие $V_{k\tau}^{q}$.

Вслед за этим счетчик этапов наращивается на единицу, производится пересчет параметров управляющего воздействия применительно к новой вторичной траектории и пункты алгоритма, начиная с определения общего объема снижения электропотребления, повторяются (рис. 13). По окончании заключительного этапа расчетный цикл завершается и производится финишная выгрузка данных, которые пополняют группу слоев OLAP-куба, содержащих данные для планирования повышения энергоэффективности на объектах техноценоза. Очевидно, что предлагаемый алгоритм может реализовываться как при моделировании еще до начала процесса управления электропотреблением, так и в режиме постоянного мониторинга уже в ходе реализации процедур. Моделирование осуществляется с целью разработки плана энергосбережения и оценки перспектив его последующего выполнения. Мониторинг в ходе управления позволяет накапливать информацию о техноценозе, фиксировать реальные результаты повышения энергоэффективности, а также корректировать управляющие воздействия в зависимости от складывающейся обстановки.

Важно видеть, что после завершения очередного этапа управления и поступления новых фактических данных по электропотреблению выполняется фиксация значения результирующего дифлекс-угла на координатной плоскости ⟨α∘t⟩ (рис. 14). При этом появляется возможность определить, так называемый, угол рассогласования траектории управления, показывающий отклонение реальной траектории от изначально спланированной:

$$\Delta\alpha^{\tau} = \alpha^{p\tau} - \alpha^{\tau}, \tag{70}$$

где $\Delta\alpha^{\tau}$ – угол рассогласования траектории управления электропотреблением техноценоза в конце τ-этапа;
$\alpha^{p\tau}$ – плановое значение дифлекс-угла в конце τ-этапа;
α^{τ} – реально зафиксированное по итогам измерений на объектах в конце τ-этапа значение дифлекс-угла.

Накапливая информацию об углах рассогласования на протяжении всего управленческого процесса, по его завершении, можно получить функцию рассогласования как аппроксимированную зависимость угла рассогласования от времени (рис. 15). Как представляется, данная функция характеризует систему управления в части параметра электропотребления и может быть использована при планировании последующих этапов.

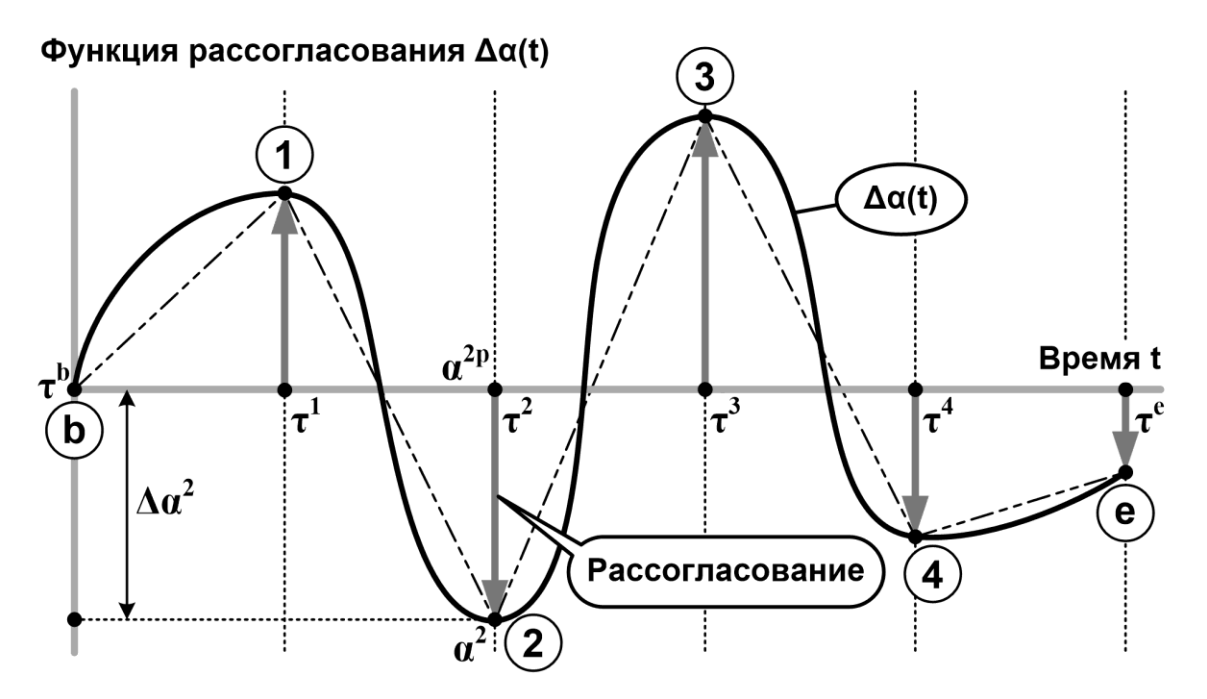


Рис. 15. Функция рассогласования управления электропотреблением техноценоза

Наибольший интерес здесь могут представлять параметры, описывающие степень отклонения функции рассогласования от оси абсцисс, что характеризует, в какой степени реальный процесс управления отличается от изначально запланированного линейного (рис. 14 и 15):

$$\begin{cases} \Delta\bar{\alpha}_{\Sigma} = \dfrac{\Delta\alpha_{\Sigma}}{t^{e} - t^{b}}, \ \Delta\alpha_{\Sigma} = \int_{t=\tau^{b}}^{t=\tau^{e}} \left|\Delta\alpha(t)\right| dt; \\ \Delta\tilde{\alpha}_{\Sigma} = \left(\dfrac{1}{t^{e} - t^{b}} \int_{t=\tau^{b}}^{t=\tau^{e}} \left(\Delta\alpha(t)\right)^{2} dt \right)^{0,5}, \end{cases} \tag{71}$$

где $\Delta\bar{\alpha}_{\Sigma}$ – среднее (по модулю) отклонение функции рассогласования процесса управления техноценоза $\Delta\alpha(t)$;

$\Delta\alpha_{\Sigma}$ – суммарное (по модулю) отклонение функции $\Delta\alpha(t)$, высчитанное за весь период процесса управления;

$\Delta\tilde{\alpha}_{\Sigma}$ – среднеквадратичное значение функции $\Delta\alpha(t)$.

В ряде случаев для оценки точности управления в условиях автоматизации могут использоваться следующие параметры (рис. 14 и 15):

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{mo} = \mathrm{Max}\left(\left\{\Delta\alpha^{\tau}\right\}_{\tau=\tau^{b}}^{\tau=\tau^{e}}\right); \\ \Delta\alpha_{ex} = \mathrm{Card}\left(\left\{\dfrac{d}{dt}\Delta\alpha(t) = 0\right\}_{\tau=\tau^{b}}^{\tau=\tau^{e}}\right), \end{cases} \tag{72}$$

где $\Delta\alpha_{mo}$ – максимальное отклонение функции рассогласования от оси абсцисс (характеризует амплитуду функции);

$\Delta\alpha_{ex}$ – количество экстремумов функции (характеризует колебательность функции рассогласования);

$\{\Delta\alpha^{\tau}\}$ – множество значений отклонения функции рассогласования на всем интервале управленческого процесса.

Не меньший интерес представляет оценка стоимости рассогласования, которая может использоваться при построении штрафных функций, широко используемых для оптимизации процесса управления:

$$W_C = W_C^{*} \cdot \Delta\alpha_{\Sigma},\ W_C^{*} = \int_{\ell}\left(\Delta W(W,x,\alpha^{\tau}) - \Delta W\left(W,x,(\alpha^{\tau}+1)\right)\right)d\ell, \tag{73}$$

где $\Delta W(W,x,\alpha)$ – ранговое гиперпараметрическое распределение;

W_C^{*} – единичный параметр стоимости рассогласования управленческого процесса (разница в совокупном электропотреблении техноценоза при изменении дифлекс-угла на один градус, кВт·ч\Т);

W_C – результирующий параметр стоимости рассогласования управленческого процесса (разница в совокупном электропотреблении техноценоза при изменении дифлекс-угла в диапазоне от α^{b} до α^{e}, кВт·ч\Т);

$\Delta\alpha_{\Sigma}$ – суммарное (по модулю) отклонение функции рассогласования процесса управления $\Delta\alpha(t)$.

Степень рассогласования процесса управления электропотреблением может также оцениваться с помощью показателей, аналогичных (70) – (72), но которые строятся на относительной функции рассогласования:

$$\Delta\alpha^{o}(t) = \frac{\Delta\alpha(t)}{\alpha(t)},\ t = \left[\alpha^{b}, \alpha^{e}\right]. \tag{74}$$

Как представляется, введенное здесь понятие степени рассогласования процесса управления электропотреблением можно распространить и на отдельные объекты техноценоза. При этом можно получить весьма важную информацию о соотношении индивидуальных и системных свойств объектов. Показатель, характеризующий отдельный объект с этой точки зрения, может быть рассчитан следующим образом. По текущему положению секущей плоскости всегда можно рассчитать дифлекс-угол α^{τ}, определяющий состояние техноценоза на данном этапе управленческого процесса (см. выражения (16) и (17)). В то же время, как мы теперь знаем, определенное по результатам квантового рангового анализа положение точки, соответствующей k-му объекту в ранговом топологическом пространстве, может не совпадать с местом данного объекта на ранговом гиперпараметрическом распределении. Следовательно, в общем случае, дифлекс-угол конкретного объекта может не совпадать с дифлекс-углом техноценоза. Предлагается разницу между этими дифлекс-углами рассматривать как индивидуальный параметр рассогласованности объекта:

$$\Delta\alpha_k^{\tau} = \left|\alpha^{\tau} - \alpha_k^{\tau}\right|, \tag{75}$$

где $\Delta\alpha_k^{\tau}$ – индивидуальный параметр рассогласованности k-го объекта техноценоза на τ-этапе процесса управления;

α_k^{τ} – дифлекс-угол k-го объекта на τ-этапе управления.

Если индивидуальный параметр рассогласованности k-го объекта пронормировать относительно доли электропотребления объекта в общем электропотреблении техноценоза, то для него можно рассчитать индивидуальный параметр стоимости рассогласования процесса управления:

$$W_{Ck}^{\tau} = W_C^{*\tau} \cdot \Delta\alpha_k^{\tau} \frac{W_k^{\tau}}{W_{\Sigma}^{\tau}}, \tag{76}$$

где W_{Ck}^{τ} – параметр стоимости рассогласования процесса управления k-го объекта техноценоза на τ-этапе;

$W_C^{*\tau}$ – единичный параметр стоимости рассогласования управленческого процесса техноценоза на τ-этапе;

$\Delta\alpha_k^{\tau}$ – параметр рассогласованности k-го объекта на τ-этапе;

W_k^{τ} – электропотребление k-го объекта на τ-этапе;

W_{Σ}^{τ} – суммарное электропотребление техноценоза на τ-этапе.

И еще об одном. Результативность процесса управления, в конечном итоге, оценивается вероятностью достижения поставленной цели [3]. Этот тезис имеет отношение не только к стадии планирования, но и к реализации. В ранговом анализе в составе процедуры ZP-анализа имеются необходимые аналитические средства для расчета, так называемого, параметра ресурсной обеспеченности процесса управления [4,9]. Как представляется, данный параметр, в условиях однопараметрического рангового топологического пространства техноценоза, может отражать вероятность достижения цели управленческого процесса. Запишем аналитическое выражение параметра ресурсной обеспеченности управления электропотреблением:

$$\begin{cases} P_u^{\tau} = 1 - \dfrac{W_C^{b\tau}}{\Delta W^{b\tau}},\ W_C^{\tau} = W_C^{*} \cdot \Delta\alpha_{\Sigma}^{b\tau},\ \tau \subset [\tau^b, \tau^e]; \\ \Delta W^{\tau e} = \int\limits_{\ell} \left(\Delta W\left(W, x, \alpha^{\tau}\right) - \Delta W\left(W, x, \alpha^{e}\right) \right) d\ell; \\ \Delta W^{b\tau} = \int\limits_{\ell} \left(\Delta W\left(W, x, \alpha^{b}\right) - \Delta W\left(W, x, \alpha^{\tau}\right) \right) d\ell, \end{cases} \tag{77}$$

где P_u^{τ} – параметр ресурсной обеспеченности управления электропотреблением техноценоза на τ-интервале;

$W_C^{b\tau}$ – параметр стоимости рассогласования управленческого процесса техноценоза на интервале времени [t = b, t = τ];

$\Delta\alpha_{\Sigma}^{b\tau}$ – суммарное (по модулю) отклонение функции Δα(t) на интервале времени [t = b, t = τ];

$\Delta W^{\tau e}$ – интегральный дифлекс-параметр техноценоза на интервале времени [t = τ, t = e];

$\Delta W^{b\tau}$ – интегральный дифлекс-параметр техноценоза на интервале времени [t = b, t = τ].

На наш взгляд, здесь подходит известная геометрическая трактовка вероятности как соотношения площадей под кривыми ранговых гиперпараметрических распределений, рассчитанных в секущей плоскости, определяющей их на ранговой гиперпараметрической поверхности (см. рис. 6). При этом вероятность достижения цели рассматривается как отношение интегрального параметрического ресурса (в данном случае – электропотребления), соответствующего стоимости рассогласования управленческого процесса техноценоза на интервале времени от начала процесса управления до рассматриваемого момента (см. рис. 15), к интегральному дифлекс-параметру техноценоза на этом же интервале времени (см. рис. 5).

Почему мы считаем, что соотношение площадей здесь имеет смысл вероятности? В условиях однопараметрического описания только этот параметр и является универсальным инвариантным мерилом результативности движения системы к цели, причем как в смысле полезного эффекта, так и затрат. Описывая состояние техноценоза ранговыми параметрическими распределениям мы постоянно помним геометрическую количественную интерпретацию, предполагающую, что площадь под кривой распределения всегда равна интегральному параметрическому ресурсу. Учитывая континуальность рангового топологического пространства и однородность времени, можно заключить, что соотношение площадей в данном случае однозначно характеризует вероятность реализации события, заключающегося в том, что процесс управления будет обеспечен в достаточной степени. Как следствие, это автоматически приводит нас к важному заключению: отношение интегрального параметрического ресурса, соответствующего стоимости рассогласования управленческого процесса техноценоза, к интегральному дифлекс-параметру техноценоза имеет смысл вероятности успешного достижения цели управления. Количественной же мерой вероятности в данном случае выступает, изменяющийся в диапазоне от нуля до единицы, параметр ресурсной обеспеченности управления электропотреблением техноценоза (см. выражение (77)). Рассмотрим аппроксимационную функцию времени, построенную для данного параметра (рис. 16).

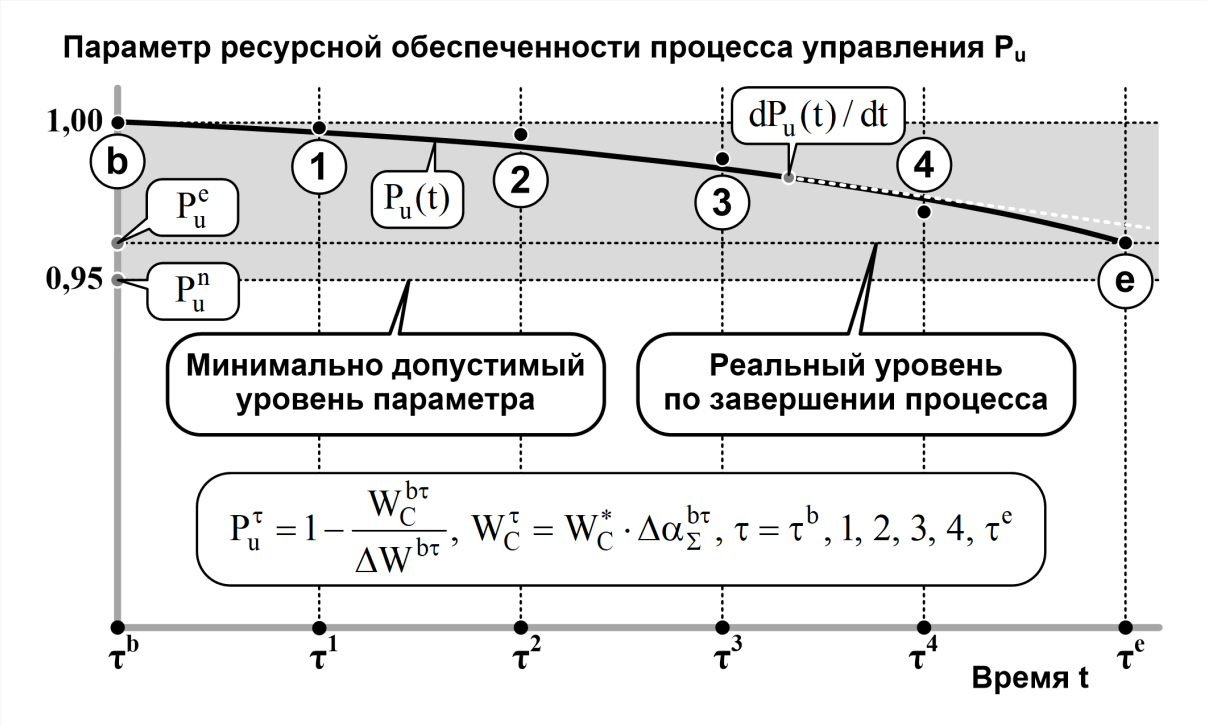


Рис. 16. Параметр ресурсной обеспеченности процесса управления электропотреблением техноценоза

На рисунке показаны эмпирические точки, соответствующие значениям параметра ресурсной обеспеченности процесса управления электропотреблением техноценоза, рассчитанного по завершении соответствующих этапов управленческого процесса. По точкам построена аппроксимационная кривая, имеющая смысл функции времени. В начальный момент, когда $t = \tau^b$, интегральный параметрический ресурс, соответствующий стоимости рассогласования управленческого процесса техноценоза, равен нулю (см. выражения (73) и (77)). Следовательно, параметр ресурсной обеспеченности в этот момент равен единице. Дальше, по мере развертывания процесса управления, интегральный параметрический ресурс будет постепенно накапливаться, а значение параметра ресурсной обеспеченности будет несколько снижаться. Исходя из этого можно заключить, что функция времени всегда будет представлять собой плавно снижающуюся кривую, начало которой соответствует значению ординаты, равному единице.

В качестве основных критериев качества процесса управления электропотреблением техноценоза, основанных на параметре ресурсной обеспеченности, представляется целесообразным рассматривать следующие:

1) не снижение конечного параметра ниже нормативного уровня:

$$P_u^{\tau=\tau^e} \geq P_u^n,\ P_u^\tau \in [0, 1],\ P_u^n \in [0, 1]; \tag{78}$$

2) максимизация интегрального значения параметра за весь период:

$$\int_{\tau=\tau^b}^{\tau=\tau^e} P_u(t)dt \to \max; \tag{79}$$

3) минимизация скорости снижения параметра в ходе мониторинга:

$$\left|\frac{dP_u(t)}{dt}\right| \to \min,\ t \in [\tau^b, \tau^e]. \tag{80}$$

Очевидно, что параметр ресурсной обеспеченности может рассматриваться в качестве ключевого показателя качества процесса управления электропотреблением техноценоза и может найти применение в самых различных критериальных комбинациях. При этом могут успешно решаться многие задачи, например: 1) выбор лучшей стратегии управления по итогам предварительного моделирования; 2) промежуточный мониторинг качества в конце каждого из этапов; 3) оценка результатов по завершении процесса управления; 4) подготовка обобщающих статистических материалов по итогам многократной реализации управленческого процесса.

Очевидно, что понятие результативности может быть использовано и для оценки вероятности достижения поставленной цели в процессе управления электропотреблением отдельным объектом, что, как и для техноценоза в целом, имеет отношение не только к стадии планирования, но и к реализации. Воспользуемся выражениями (75) – (77) и запишем аналитическую зависимость для параметра ресурсной обеспеченности управления электропотреблением k-го объекта техноценоза на τ-интервале:

$$\begin{cases} P_{uk}^{\tau} = 1 - \dfrac{W_{Ck}^{b\tau}}{\Delta W_k^{b\tau}},\ W_{Ck}^{\tau} = W_{Ck}^{*} \cdot \Delta\alpha_k^{b\tau},\ \tau \subset [\tau^b, \tau^e]; \\ \Delta W_k^{\tau e} = \Delta W_k^{\tau}\left(W_k^{\tau}, x_k^{\tau}, \alpha_k^{\tau}\right) - \Delta W_k^{e}\left(W_k^{e}, x_k^{e}, \alpha_k^{e}\right); \\ \Delta W^{b\tau} = \Delta W_k^{b}\left(W_k^{b}, x_k^{b}, \alpha_k^{b}\right) - \Delta W_k^{\tau}\left(W_k^{\tau}, x_k^{\tau}, \alpha_k^{\tau}\right), \end{cases} \tag{81}$$

где P_{uk}^{τ} – параметр ресурсной обеспеченности управления электропотреблением k-го объекта техноценоза на τ-интервале;

$W_{Ck}^{b\tau}$ – параметр стоимости рассогласования управленческого процесса k-го объекта на интервале времени [t = b, t = τ];

$\Delta\alpha_k^{b\tau}$ – параметр рассогласованности k-го объекта техноценоза на интервале времени [t = b, t = τ];

$\Delta W_k^{\tau e}$ – текущий дифлекс-параметр k-го объекта техноценоза на интервале времени [t = τ, t = e];

$\Delta W_k^{b\tau}$ – текущий дифлекс-параметр k-го объекта техноценоза на интервале времени [t = b, t = τ].

Если сопоставить каждой точке рангового топологического пространства (R,{T}) значение параметра ресурсной обеспеченности управления электропотреблением, то можно получить скалярное поле (рис. 17):

$$F:\left(\omega_k^{\tau}\left(\alpha_k^{\tau}, \delta_k^{\tau}, x_k^{\tau}\right)\right) \xrightarrow[(R,\{T\})]{} P_{uk}^{\tau}\left(\alpha_k^{\tau}, \delta_k^{\tau}, x_k^{\tau}\right), \tag{82}$$

где P_{uk}^{τ} – параметр ресурсной обеспеченности управления электропотреблением k-й точки (R,{T}) на τ-интервале;

ω_k^{τ} – k-ая точка (R,{T}) на τ-интервале времени с координатами, соответствующими дифлекс-углу α, тангенс-фактору δ и ранговой топологической мере x (рис. 17).

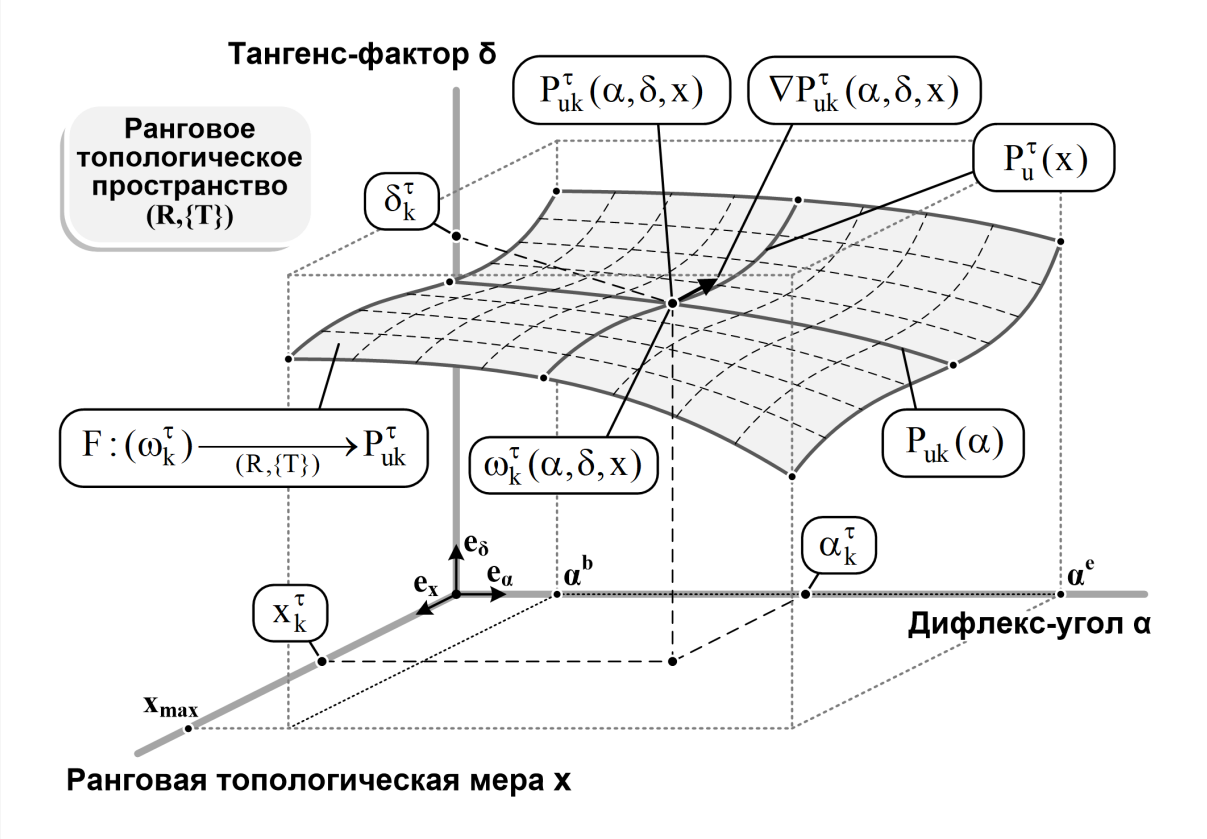


Рис. 17. Скалярное поле параметра ресурсной обеспеченности процесса управления электропотреблением объектов техноценоза в ранговом топологическом пространстве

Исследование скалярного поля P_u позволяет получить весьма важные характеристики, которые могут быть использованы в процессе управления электропотреблением объектов техноценоза. В первую очередь, интересен градиент скалярного поля P_u. Известно, что для случая трехмерного пространства градиентом дифференцируемой в некоторой области скалярной функции $P_u(\alpha,\delta,x)$ называется векторная функция с компонентами [1]:

$$\frac{\partial P_u}{\partial \alpha}, \frac{\partial P_u}{\partial \delta}, \frac{\partial P_u}{\partial x}. \tag{83}$$

Используя для единичных векторов по осям прямоугольных декартовых координат пространства (R,{T}) параметры α, δ, x, получаем:

$$\mathrm{grad}\left(P_u(\alpha,\delta,x)\right) = \nabla P_u(\alpha,\delta,x) = \frac{\partial P_u}{\partial \alpha} e_\alpha + \frac{\partial P_u}{\partial \delta} e_\delta + \frac{\partial P_u}{\partial x} e_x, \tag{84}$$

где e_α, e_δ, e_x – единичные вектора по осям, соответственно, α, δ, x;
∇ – оператор набла (эквивалентен градиенту).

Поскольку формула полного дифференциала не зависит от вида координат, т.е. от природы параметров α, δ, x вообще, используя интегральную теорему, градиент P_u можно выразить в интегральной форме [1]:

$$\nabla P_u = \lim_{V \to 0} \frac{1}{V} \left(\iint_S P_u ds \right), \tag{85}$$

где S – замкнутая поверхность, охватывающая объем V;
ds – нормальный элемент поверхности S.

Дадим определение. Прежде всего, заметим, что градиент скалярного поля параметра ресурсной обеспеченности управления электропотреблением техноценоза P_u определяется в каждой k-й точке рангового топологического пространства (R,{T}) отдельно на каждом τ-интервале времени. Градиентом называется вектор, направленный в сторону наискорейшего роста скалярной величины P_u, значение которой меняется от одной точки пространства (R,{T}) к другой, образуя скалярное поле P_u. Наконец, он имеет модуль, равный скорости роста величины P_u в направлении градиента. Очевидно, что понятие градиента (или антиградиента) может быть использовано при построении алгоритмов решения оптимизационных задач управления электропотреблением объектов техноценоза. И здесь найдут применение различные методы (как математические, так и численные), объединенные в общую группу градиентных методов оптимизации, в частности: наискорейшего спуска (метод градиента), покоординатного спуска (Гаусса – Зейделя), сопряженных градиентов, метод Чебышева и др.

В то же время, если каждой точке рангового топологического пространства (R,{T}) поставить в соответствие значение градиента параметра ресурсной обеспеченности процесса управления электропотреблением объектов техноценоза, то можно получить векторное поле (рис. 18).

Рассмотрим подробнее операции над градиентом. Итак, вектора градиента параметра ресурсной обеспеченности управления электропотреблением P_u, будучи определенными в каждой k-й точке на каждом τ-интервале времени, образуют в ранговом топологическом пространстве (R,{T}) векторное поле, которое описывается вектор-функцией следующего вида:

$$\nabla P_u(\rho) = \left(\nabla P_u^{\alpha}(\alpha,\delta,x), \nabla P_u^{\delta}(\alpha,\delta,x), \nabla P_u^{x}(\alpha,\delta,x) \right), \tag{86}$$

где ρ – радиус-вектор, задающий положение точки в пространстве (R,{T}) относительно точки начала координат, который в заданной системе координат имеет вид: ρ(α,δ,x).

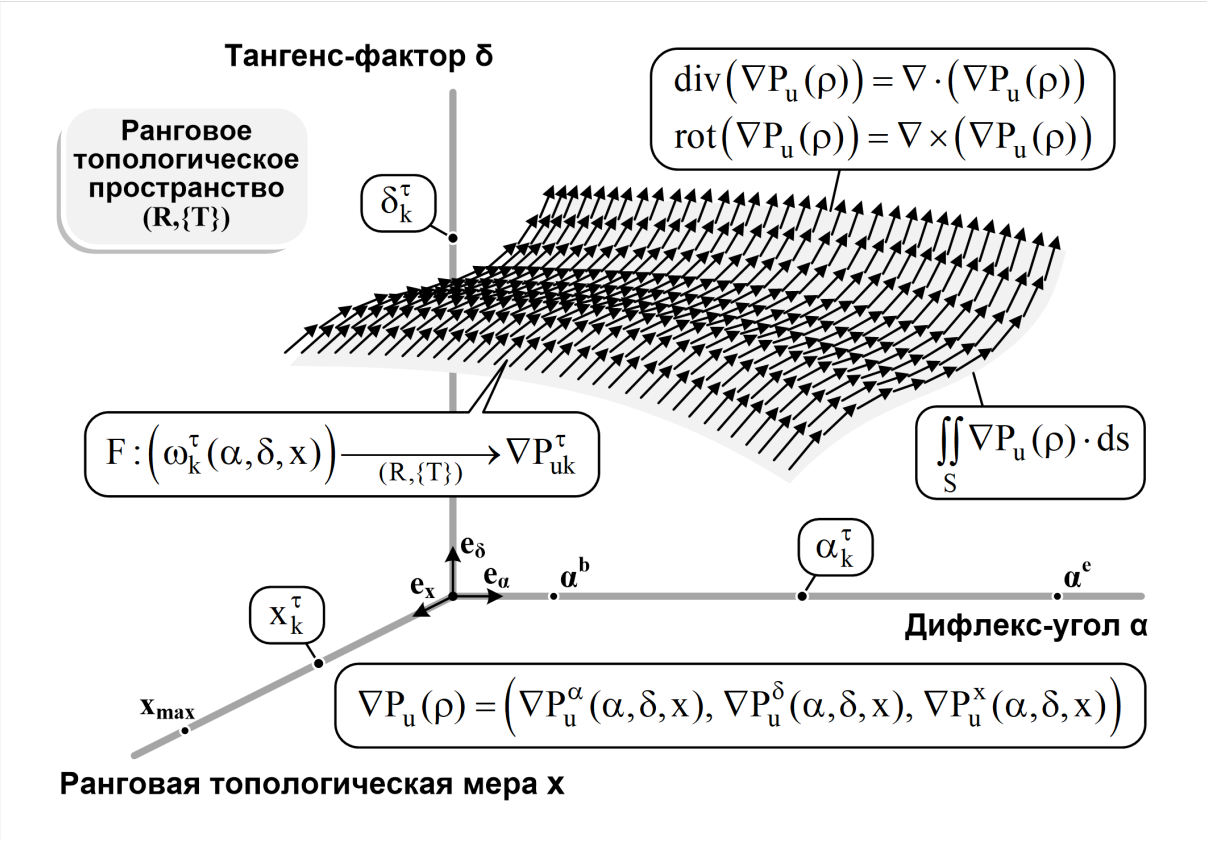


Рис. 18. Векторное поле градиента параметра ресурсной обеспеченности процесса управления электропотреблением объектов техноценоза в ранговом топологическом пространстве

В трехмерном ранговом топологическом пространстве (R,{T}) имеют смысл следующие характеристики векторного поля градиента (рис. 18):

1) криволинейный интеграл, вычисляемый вдоль гладкой кривой:

$$\int_C \nabla P_u(\rho) \cdot d\ell, \tag{87}$$

где $d\ell$ – векторный элемент криволинейного пути, вдоль которого происходит интегрирование (точка перед векторным элементом означает скалярное произведение);

C – конкретная кривая – путь интегрирования (обычно гладкая);

2) циркуляция векторного поля (интеграл по замкнутому контуру):

$$\oint_C \nabla P_u(\rho) \cdot d\ell; \tag{88}$$

3) поток поля через поверхность S, определяемый как интеграл по S:

$$\iint\limits_{S} \nabla P_u(\rho) \cdot ds, \tag{89}$$

где ds – «векторный элемент поверхности», определяемый, как вектор единичной нормали, умноженный на элемент площади ds;

4) производная, аналогом которой для векторного поля выступает тензор частных производных, имеющий в декартовых координатах вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla P_u^{\alpha}}{\partial \alpha}(\alpha,\delta,x) & \frac{\partial \nabla P_u^{\alpha}}{\partial \delta}(\alpha,\delta,x) & \frac{\partial \nabla P_u^{\alpha}}{\partial x}(\alpha,\delta,x) \\ \frac{\partial \nabla P_u^{\delta}}{\partial \alpha}(\alpha,\delta,x) & \frac{\partial \nabla P_u^{\delta}}{\partial \delta}(\alpha,\delta,x) & \frac{\partial \nabla P_u^{\delta}}{\partial x}(\alpha,\delta,x) \\ \frac{\partial \nabla P_u^{x}}{\partial \alpha}(\alpha,\delta,x) & \frac{\partial \nabla P_u^{x}}{\partial \delta}(\alpha,\delta,x) & \frac{\partial \nabla P_u^{x}}{\partial x}(\alpha,\delta,x) \end{bmatrix}; \tag{90}$$

5) дивергенция, которая в прямоугольных декартовых координатах:

$$\operatorname{div}\left(\nabla P_u(\rho)\right) = \nabla \cdot \left(\nabla P_u(\rho)\right) = \frac{\partial \nabla P_u^{\alpha}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \nabla P_u^{\delta}}{\partial \delta} + \frac{\partial \nabla P_u^{x}}{\partial x}; \tag{91}$$

6) ротор, который определяется как вектор с координатами:

$$\operatorname{rot}\left(\nabla P_u(\rho)\right) = \nabla \times \left(\nabla P_u(\rho)\right) =$$
$$= \left(\frac{\partial \nabla P_u^{x}}{\partial \delta} - \frac{\partial \nabla P_u^{\delta}}{\partial x}\right) e_{\alpha} + \left(\frac{\partial \nabla P_u^{\alpha}}{\partial x} - \frac{\partial \nabla P_u^{x}}{\partial \alpha}\right) e_{\delta} + \left(\frac{\partial \nabla P_u^{\delta}}{\partial \alpha} - \frac{\partial \nabla P_u^{\alpha}}{\partial \delta}\right) e_{x}, \tag{92}$$

где e_{α}, e_{δ}, e_x – единичные орты для осей α, δ, x соответственно;

7) поток через замкнутую поверхность S, окружающую объем V:

$$\oiint\limits_{S} \nabla P_u(\rho) \cdot ds = \iiint\limits_{V} \operatorname{div}\left(\nabla P_u(\rho)\right) \cdot dv. \tag{93}$$

Известно, что векторное поле, дивергенция которого всюду равна нулю, называется соленоидальным и оно может быть представлено как ро-

тор некоторого другого векторного поля. Векторное поле, ротор которого равен нулю в любой точке, называется потенциальным и оно может быть представлено как градиент некоторого скалярного поля. По теореме Гельмгольца, если всюду в некоторой области у векторного поля определены дивергенция и ротор, то это поле может быть представлено в виде суммы потенциального и соленоидального полей. Векторное поле, у которого дивергенция и ротор всюду равны нулю, называется гармоническим и его потенциал представляет собой гармоническую функцию. Однако с точки зрения управления электропотреблением наиболее важно, что векторное поле градиента параметра ресурсной обеспеченности техноценоза, независимо от его характеристик, является производным от скалярного поля.

Чем же полезно подобное математическое описание процесса управления техноценозом? На скалярном поле параметра ресурсной обеспеченности можно осуществить ряд важных расчетов. В первую очередь рассчитываются следующие интегральные параметры ресурсной обеспеченности:

1) техноценоза в целом на всем интервале управления от α^b до α^e:

$$P_{u\Sigma} = \int_{\alpha^b}^{\alpha^e} \int_0^{x_{max}} P_u(\alpha, \delta, x)\, dx\, d\alpha, \tag{94}$$

где x_{max} – максимальное значение ранговой топологической меры;

2) k-го объекта техноценоза на интервале управления от α^b до α^e:

$$P_{uk\Sigma} = \int_{\alpha^b}^{\alpha^e} P_{uk}(\alpha, \delta, x)\, d\alpha; \tag{95}$$

3) техноценоза в целом на фиксированном τ-интервале процесса:

$$P_{u\Sigma}^{\tau} = \int_0^{x_{max}} P_u^{\tau}(\alpha, \delta, x)\, dx. \tag{96}$$

С точки зрения подготовки материалов для СППР управления электропотреблением объектов техноценоза не меньший интерес представляют относительные интегральные параметры ресурсной обеспеченности:

1) техноценоза в целом на τ-интервале управления электропотреблением относительно техноценоза в целом на всем интервале от α^b до α^e:

$$P^{*}_{u1} = \frac{P^{\tau}_{u\Sigma}}{P_{u\Sigma}}; \tag{97}$$

2) k-го объекта на всем интервале управления от α^{b} до α^{e} относительно техноценоза в целом на всем интервале управления от α^{b} до α^{e}:

$$P^{*}_{u2} = \frac{P_{uk\Sigma}}{P_{u\Sigma}}; \tag{98}$$

3) k-го объекта на τ-интервале управления электропотреблением относительно техноценоза в целом на τ-интервале процесса управления:

$$P^{*}_{u3} = \frac{P^{\tau}_{uk}}{P^{\tau}_{u\Sigma}}; \tag{99}$$

4) k-го объекта на τ-интервале управления электропотреблением относительно k-го объекта на всем интервале управления от α^{b} до α^{e}:

$$P^{*}_{u4} = \frac{P^{\tau}_{uk}}{P_{uk\Sigma}}; \tag{100}$$

5) k-го объекта на τ-интервале управления электропотреблением относительно техноценоза в целом на всем интервале управления от α^{b} до α^{e}:

$$P^{*}_{u5} = \frac{P^{\tau}_{uk}}{P_{u\Sigma}}. \tag{101}$$

Результаты расчетов, выполняемых аналитической подсистемой и поступающих с материалами в СППР [11], фиксируются в базе данных техноценоза по электропотреблению в форме гиперпараметров P_u [10]:

1) абсолютных значений параметра ресурсной обеспеченности:

$$\left\langle P^{TSSR}_{uk\tau} \right\rangle = \left\langle \left\langle P^{\tau}_{uk} \right\rangle \right\rangle; \tag{102}$$

2) относительных значений параметра ресурсной обеспеченности:

$$\left\langle P_{uk\tau}^{*TSSR} \right\rangle = \left\langle \left\langle P_{uk}^{*\tau} \right\rangle \right\rangle; \tag{103}$$

3) значений градиента параметра ресурсной обеспеченности:

$$\left\langle \nabla P_{uk\tau}^{TSSR} \right\rangle = \left\langle \left\langle \nabla P_{uk}^{\tau} \right\rangle \right\rangle; \tag{104}$$

4) координат точек в ранговом топологическом пространстве:

$$\left\langle \Omega_{k\tau}^{TSSR} \right\rangle = \left\langle \left\langle \Omega_{k}^{\tau}(\alpha, \delta, x) \right\rangle \right\rangle. \tag{105}$$

Все это позволяет оценивать успешность выполнения задачи управления электропотреблением в рамках произвольной {q,s}-выборки объектов. Если исходить из того, что в ранговом топологическом пространстве безусловно выполняется принцип аддитивности, то можно записать:

$$P_{u\Sigma}^{*qs} = \sum_{j=1}^{\max\{s\}} \sum_{i=1}^{\max\{q\}} P_{u5i}^{*j}, \{q\} \in [1,...,n]; \{s\} \in [1,...,m], \tag{106}$$

где {q} – выборка объектов из общего количества в техноценозе;
{s} – выборка интервалов процесса управления из общего числа.

Наконец мы готовы сформировать результирующий критерий качества процесса управления электропотреблением техноценоза, основанный на относительном параметре ресурсной обеспеченности. Как представляется, в зависимости от конкретной ситуации могут рассматриваться критерии, имеющие отношение к техноценозу в целом, выделенной выборке объектов или отдельно взятому объекту. Запишем целевые функции:

$$P_{u\Sigma}^{*} = \sum_{\tau=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} P_{u5k}^{*\tau} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max; \tag{107}$$

$$P_{uq\Sigma}^{*s} = \sum_{j=1}^{\max\{s\}} \sum_{i=1}^{\max\{q\}} P_{u5i}^{*j} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max, \{q\} \in [1,...,n]; \{s\} \in [1,...,m]; \tag{108}$$

$$P_{uk\Sigma}^{*} = \sum_{k=1}^{n} P_{u5k}^{*\tau} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max, \tau = const; \tag{109}$$

$$P_{uq\Sigma}^{*} = \sum_{i=1}^{\max\{q\}} P_{u5i}^{*\tau} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max, \tau = const; \{q\} \in [1,...,n]; \tag{110}$$

$$P^{*\tau}_{u\Sigma} = \sum_{\tau=1}^{m} P^{*\tau}_{u5k} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max,\ k = const; \tag{111}$$

$$P^{*s}_{uk\Sigma} = \sum_{j=1}^{\max\{s\}} P^{*j}_{u5k} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max,\ k = const; \{s\} \in [1,...,m]; \tag{112}$$

$$P^{*\tau}_{uk} = P^{*\tau}_{u5k} \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max,\ \tau = const;\ k = const, \tag{113}$$

где P^{*}_{u5} – относительный интегральный параметр ресурсной обеспеченности k-го объекта на τ-интервале управления относительно техноценоза в целом на всем интервале управления.

В зависимости от стоящих задач целевые функции (107) – (113) могут применяться следующим образом: первая – для оценки техноценоза в целом на всем промежутке управления; вторая – для произвольной выборки объектов (подразделение, группа с определенными значениями параметра, кластер, полученный после реализации процедур «Data mining» и т.д.); третья – для техноценоза в целом на выделенном этапе управленческого процесса; четвертая – для выделенной группы объектов на выделенном этапе; пятая – для отдельного объекта техноценоза на всем промежутке управления; шестая – для отдельного объекта на выделенной группе этапов; седьмая – для отдельного объекта на выделенном этапе.

Для полноценного формирования критерия качества управления электропотреблением объектов техноценоза к изложенной выше совокупности целевых функций необходимо добавить следующие ограничения:

$$\begin{cases} \left\{\forall \omega^{\tau}_{k}\left(\alpha^{\tau}_{k},\delta^{\tau}_{k},x^{\tau}_{k}\right) \in \left(R,\{T\}\right)\right\} \exists \left(\nabla P^{\tau}_{uk}\left(\alpha^{\tau}_{k},\delta^{\tau}_{k},x^{\tau}_{k}\right)\right); \\ \left\{\forall \omega^{\tau}_{k}\left(\alpha^{\tau}_{k},\delta^{\tau}_{k},x^{\tau}_{k}\right) \in \left(R,\{T\}\right)\right\} \operatorname{div}\left(\nabla P^{\tau}_{uk}\left(\alpha^{\tau}_{k},\delta^{\tau}_{k},x^{\tau}_{k}\right)\right) = 0; \\ \left\{\forall \omega^{\tau}_{k}\left(\alpha^{\tau}_{k},\delta^{\tau}_{k},x^{\tau}_{k}\right) \in \left(R,\{T\}\right)\right\} \operatorname{rot}\left(\nabla P^{\tau}_{uk}\left(\alpha^{\tau}_{k},\delta^{\tau}_{k},x^{\tau}_{k}\right)\right) = 0, \end{cases} \tag{114}$$

где $\forall$ и $\exists$ – кванторы существования и всеобщности.

Первое ограничение в системе (114) налагает на скалярное поле параметра ресурсной обеспеченности условие дифференцируемости в каждой точке области определения рангового топологического пространства. Второе и третье ограничения (114) формально требуют, чтобы векторное поле градиента параметра было гармоническим. Фактически это означает полную независимость объектов в реализации плановых показателей электропотребления, определенных системой управления техноценоза.

Прежде всего, заметим, что выше в разделе «Управление электропотреблением объектов техноценоза» мы изложили методику расчета основных показателей ZP-плана (плана повышения энергоэффективности объектов техноценоза). Однако все это имело отношение к, так называемым, «простым» стратегиям управления электропотреблением. Подобных стратегий может быть множество (мы предложили две), но их все объединяет общий детерминированный алгоритм. На каждом его этапе реализуются следующие процедуры: формирование ZP-матрицы; расчет общего объема снижения электропотребления техноценоза; на основе текущего дифлекс параметра объекта определение весового коэффициента и плановой нормы снижения электропотребления; формирование общего ZP-плана энергосбережения техноценоза. Ключевая идея, заложенная в алгоритме ZP-планирования, сводится к тому, что норма снижения электропотребления объекта должна быть поставлена в зависимость от степени близости его текущего электропотребления к нижней границе области допустимых значений техноценоза, получаемой по итогам ZP-нормирования (рис. 13) [4,9]. Фактически в простых стратегиях ставится детерминированная задача приведения техноценоза в заданную точку управленческого процесса в течение заданного промежутка времени. На рисунке 14 это интерпретируется как перемещение системы по линейной траектории из начальной точки «b» в конечную точку «e» в течение пяти интервалов времени (от τ^b до τ^e).

Как представляется, применять критерий управления, основанный на выражениях (107) – (114), целесообразно в более сложных, так называемых, экстремальных стратегиях. В подобных стратегиях реализуется следующая идея: процедурам ZP-нормирования и ZP-планирования, составляющим ZP-модуль управления электропотреблением объектов техноценоза, должен предшествовать оптимизационный процесс (рис. 19).

Вспомним, что в процессе реализации процедуры ZP-планирования в техноценозе создается фонд энергосбережения, который формируется за счет средств, вырученных от экономии электроэнергии объектами:

$$C_{\Sigma}^{PL} = \sum_{\tau=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} C_{k\tau}^{PL} = \sum_{\tau=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}\left(\Delta W_k^{\tau}\cdot se\right), \qquad (115)$$

где C_{Σ}^{PL} – объем средств, формирующих фонд энергосбережения техноценоза по завершении процесса управления;

$C_{k\tau}^{PL}$ – объем средств, выручаемых за счет экономии электроэнергии k-ым объектом на τ-этапе управления;

ΔW_k^{τ} – количество электроэнергии, сэкономленной k-ым объектом техноценоза на τ-этапе управления;

se – базовый тариф на электроэнергию, предъявляемый объектам со стороны энергосбытовой компании.

Из фонда энергосбережения финансируются денежные премии, выдаваемые обслуживающему и управленческому персоналу, а также затраты на модернизацию и перевооружение электрооборудования с целью повышения энергоэффективности. Индивидуальная доля премирования объекта техноценоза зависит от рассчитанного по выражению (57) весового коэффициента и состоит из двух слагаемых, первое из которых определяет размер премий, а второе – объем инвестиций в энергосбережение:

$$\begin{cases} C_{k\tau}^{PR} = \gamma_{PR} \cdot C_{k\tau}^{PLB}; \\ C_{k\tau}^{IN} = \gamma_{IN} \cdot C_{k\tau}^{PLB}, \end{cases} \tag{116}$$

где $C_{k\tau}^{PR}$ – размер премий персоналу k-го объекта техноценоза за успехи в экономии электроэнергии на τ-этапе;

$C_{k\tau}^{IN}$ – объем инвестиций в энергосбережение (перевооружение и модернизацию) k-го объекта техноценоза на τ-этапе;

$C_{k\tau}^{PLB}$ – пересчитанный с учетом весового коэффициента (см. выражение (57)) объем средств, выручаемых за счет экономии электроэнергии k-ым объектом на τ-этапе;

γ_{PR} – коэффициент, учитывающий установленную в системе управления техноценоза долю отчислений от сэкономленных средств в фонде энергосбережения, нацеленных на последующее премирование персонала;

γ_{IN} – коэффициент, учитывающий установленную в системе управления техноценоза долю отчислений от сэкономленных средств в фонде энергосбережения, нацеленных на последующее перевооружение и модернизацию.

В итоге для k-го объекта на τ-этапе получаем индивидуальную совокупную долю премирования в общем фонде энергосбережения:

$$C_{k\tau}^{OT} = C_{k\tau}^{PR} + C_{k\tau}^{IN}. \tag{117}$$

Для техноценоза, будучи взятого в целом, за весь период управления электропотреблением можно записать следующее выражение:

$$C_{\Sigma}^{OT} = \sum_{\tau=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} C_{k\tau}^{OT} = \sum_{\tau=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}\left(C_{k\tau}^{PR} + C_{k\tau}^{IN}\right). \tag{118}$$

Замысел оптимизационного процесса состоит в следующем. Предполагается, что процесс управления электропотреблением объектов техноценоза характеризуется двумя интегральными показателями: положительного эффекта, в качестве которого используется совокупный показатель ресурсной обеспеченности, и затрат, в качестве которого используется относительная доля премирования в общем фонде энергосбережения. Параметрами варьирования выступают: коэффициент тарифного разрыва sk = se/sc, показывающий соотношение между тарифом энергосбытовой компании и внутрикорпоративным тарифом, а также коэффициенты γ_{PR} и γ_{IN}. Следует понимать, что внутрикорпоративный тариф sc, как правило, несколько превосходит базовый тариф se, предъявляемый объектам энергосбытовой компанией. Он является стимулирующим и применяется при тарификации только той доли электроэнергии, которая выступает базовой при расчете отчислений объектам из фонда энергосбережения на премирование персонала, а также модернизацию и перевооружение. Таким образом, в ходе управления электропотреблением возникает тарифный разрыв, который дополнительно стимулирует объекты к повышению энергоэффективности, а покрывается из общего фонда энергосбережения и внешних источников финансирования. Коэффициенты γ_{PR} и γ_{IN}, как правило, устанавливаются в диапазоне от 0 до 0,5 и учитывают установленную в системе управления нормативную долю отчислений из фонда энергосбережения, соответственно, на премирование персонала объектов и перевооружение оборудования.

Итак, интегральный показатель эффективности, который традиционно интерпретируется как соотношение «полезный эффект – затраты»:

$$\begin{cases} IP(sc_k^{\tau}, \gamma_{PR}, \gamma_{IN}) = \dfrac{IP_W}{IP_Z} = \dfrac{P_{u\Sigma}^*}{1 + C_{\Sigma}^{OT} / C_{\Sigma}^{PL}}; \\ IP \in [0, 1];\ IP_W \in [0, 1];\ IP_Z \in [1, +\infty); \\ P_{u\Sigma}^* \in [0, 1];\ C_{\Sigma}^{OT} \in [0, +\infty);\ C_{\Sigma}^{PL} > 0. \end{cases} \quad (119)$$

где IP – интегральный показатель эффективности процесса управления электропотреблением объектов техноценоза, рассчитанный на момент достижения конечной цели;

IP_W – интегральный показатель качества управления;

IP_Z – интегральный показатель затрат на управление;

$P_{u\Sigma}^*$ – совокупный показатель ресурсной обеспеченности процесса управления электропотреблением объектов техноценоза, рассчитанный на момент достижения конечной цели;

C_{Σ}^{OT} – совокупная доля премирования в общем фонде энергосбережения, рассчитанная на момент достижения цели;

C_{Σ}^{PL} – объем средств, формирующих фонд энергосбережения техноценоза, рассчитанный на момент достижения цели.

Анализ [119] показывает, что интегральный показатель IP_W исчисляется в диапазоне [0,1], левая граница которого соответствует нулевому параметру ресурсной обеспеченности процесса управления, а правая – параметру, равному единице. В первом случае вероятность достижения цели управления электропотреблением равна нулю, во втором – единице (цель будет гарантированно достигнута). В свою очередь, интегральный показатель IP_Z исчисляется в диапазоне [1,+∞). Левая граница показателя соответствует состоянию с нулевыми затратами на премирование и перевооружение в общем фонде энергосбережения, правая – состоянию с бесконечными затратами. Предполагается, что эти затраты могут превышать размер общего фонда энергосбережения и, таким образом, покрываться за счет внешних источников. Очевидно, что при этом интегральный показатель эффективности IP находится в диапазоне [0,1], приобретая свое критериальное значение при строгом выполнении следующего равенства: IP = 1.

Критерий оптимального управления электропотреблением рассчитывается на момент достижения цели и выглядит следующим образом:

$$IP(sk, \gamma_{PR}, \gamma_{IN}) \xrightarrow[(R,\{T\})]{} \max_{sk=se/sc}, \qquad (120)$$

где IP – функция интегрального показателя эффективности, поставленного в зависимость от параметров варьирования;

sk – коэффициент тарифного разрыва (sk = se/sc);

γ_{PR} – коэффициент доли отчислений на премирование;

γ_{IN} – коэффициент доли отчислений на перевооружение.

Как видим, критерий (120) предполагает в ранговом топологическом пространстве максимизацию целевой функции, в качестве которой используется интегральный показатель эффективности (119), поставленный в зависимость от параметров варьирования (sk, γ_{PR} и γ_{IN}). Поиск максимума функции IP может осуществляться различными методами. В любом случае устанавливаются входные параметры, затем на основе цифрового профиля электропотребления техноценоза, а также ZP-модуля (ZP-нормирования, ZP-планирования и мониторинга конверсии) рассчитывается значение целевой функции и делается вывод о достижении оптимума (рис. 19).

Очевидно, что для применения критерия (120) необходимо непрерывно осуществлять имитационное моделирование процесса электропотребления объектов техноценоза на всем интервале управления вплоть до

момента достижения конечной цели. Результатом моделирования будут постоянно, по мере поступления новых данных, изменяющиеся скалярное и векторное поля параметра ресурсной обеспеченности, на которых будет реализовываться оптимизационный процесс. Все это станет частью цифрового профиля управления электропотреблением техноценоза (рис. 19).

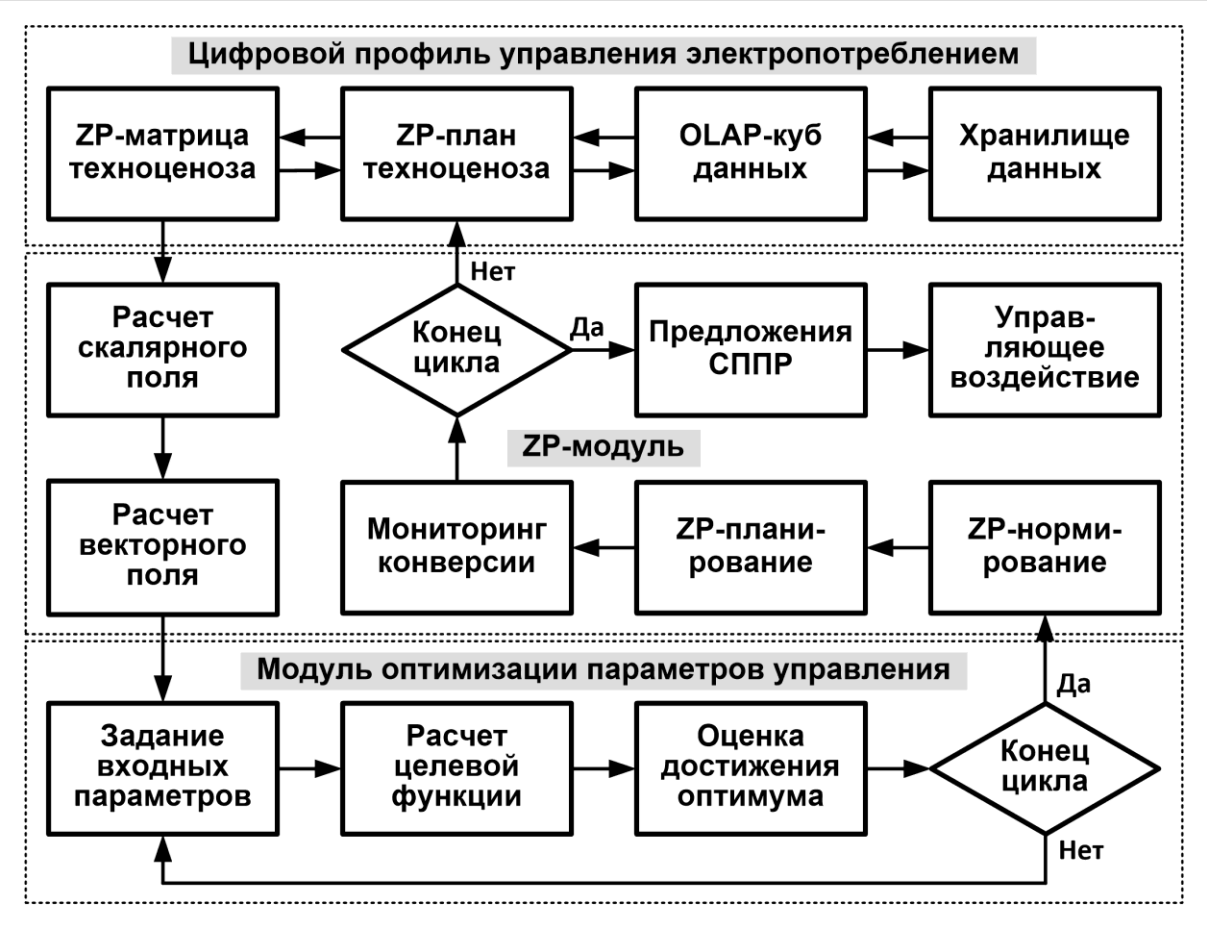


Рис. 19. Алгоритм реализации экстремальной стратегии оптимального управления электропотреблением техноценоза

Моделирование электропотребления в техноценозе осуществляется с помощью стандартных преобразующих функций, как правило, получаемых путем нелинейного преобразования соответствующих функций распределения. У нас в работе [9] достаточно подробно изложена методика имитационного моделирования электропотребления объектов техноценоза, основанная на законах Вейбулла – Гнеденко и нормальном, а также интегральной функции полезности и понятии ожидаемой полезности процедур энергосбережения. Кроме того, в процессе имитационного моделирования учитывается параметр ресурсной обеспеченности процесса управления, который, как мы уже знаем, имеет смысл вероятности достижения цели.

Заключение

Объект нашего исследования – социально-экономико-техническая система (СЭТ-система), при исследовании которой мы всегда имеем дело с фракталоподобной дисконтинуальной средой, а также статистическими выборками данных, на которых не работает аксиоматика закона больших чисел и центральных предельных теорем. При рассмотрении СЭТ-системы находит применение универсальная абстрактная модель – техноценоз – ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная совокупность технических изделий и пространственно-технологических кластеров, объединенных слабыми информационными и технологическими связями. Управление техноценозом реализуется в рамках методологии рангового анализа – метода исследования, имеющего целью статистический анализ, а также оптимизацию, моделирование и управление, включающего стандартные и тонкие процедуры параметрического нормирования, интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенширования. Характерным примером техноценоза является региональный электротехнический комплекс, который рассматривается как ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная и взаимодействующая совокупность потребителей и приемников электроэнергии, реализующая в единой системе всестороннего обеспечения цель управления электропотреблением.

Успешное управление техноценозом обусловливается тремя ключевыми аспектами: идентификацией объекта управления, постановкой задачи управления и реализацией процесса управления (рис. 20). На этапе идентификации объекта управления выполняются три задачи: формирование цифрового двойника, построение ранговых гиперпараметрических распределений и расчет детерминированных инвариантов. Именно здесь находит применение квантовый ранговый анализ. Постановка задачи управления включает в себя создание цифрового профиля, выбор критерия и построение алгоритма управления. Третий этап – реализация процесса управления предполагает решение следующих задач: выработка предложений СППР, формирование управляющего воздействия и мониторинг результатов.

Цифровой двойник техноценоза включает в себя две основные составляющие: хранилище данных, организованное в форме OLAP-куба, и программный функционал, реализующий процедурный комплекс рангового анализа. Реализация программного функционала на данных OLAP-куба, последовательно решая задачи построения ранговых гиперпараметрических распределений и расчета детерминированных инвариантов, позволяет сформировать и далее поддерживать в актуальном состоянии цифровой профиль техноценоза. Выбор алгоритма и построение критерия управленческого процесса создают предпосылки успешной работы СППР техноценоза, которая вырабатывает и направляет в систему управления все необ-

ходимые данные для формирования управляющих воздействий на объекты техноценоза. По завершении работы системы осуществляется мониторинг результативности и начинается новый цикл управления (рис. 20).

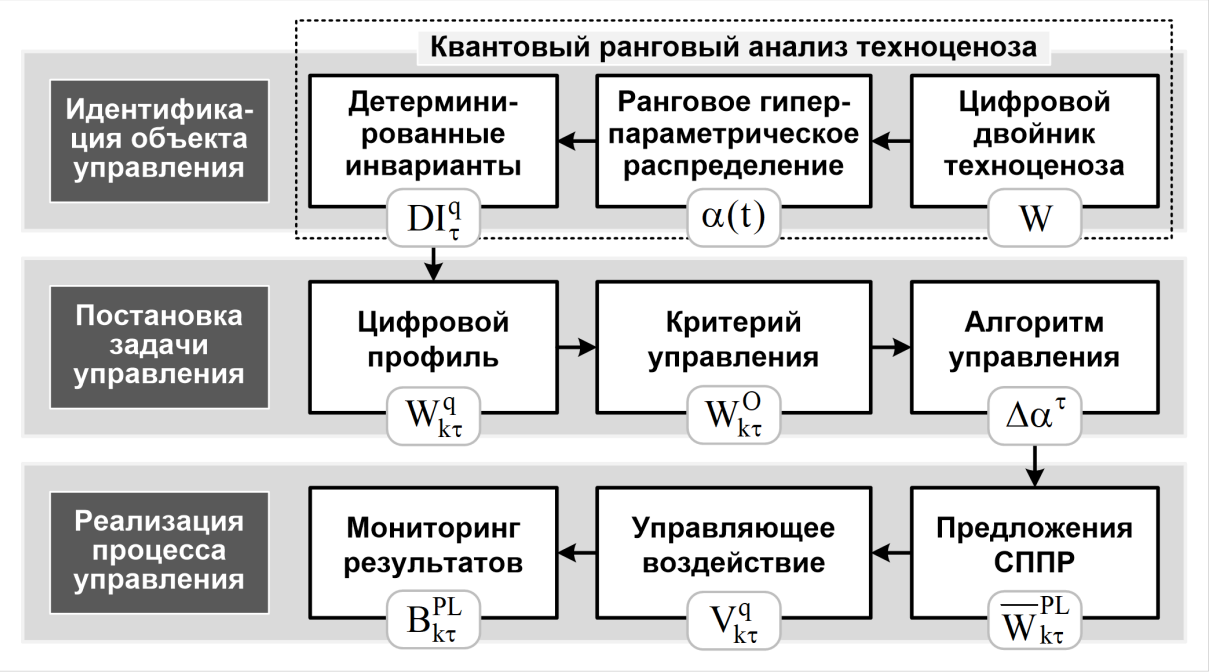


Рис. 20. Место квантового рангового анализа в управлении техноценозом

Если говорить о современном состоянии, то наименее разработанной представляется область идентификации техноценоза как объекта управления. Остаются нерешенными ряд ключевых задач, касающихся методологии определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений. Кроме того, недостаточно исследованы закономерности ранговой динамики в топологическом пространстве, что не позволяет считать решенной проблему моделирования и фиксации положения точек, соответствующих объектам техноценоза на ранговых гиперпараметрических распределениях. И здесь для решения ряда наиболее сложных задач мы впервые делаем попытку заложить основы, так называемой, квантовой ранговой динамики. Подтверждение наличия квантовых эффектов и выполнения принципа неопределенности в техноценозе позволяет в области ранговой топологии применить математический аппарат квантовой теории и сформировать на этой основе теорию квантового рангового анализа. При этом наиболее сложные задачи определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений техноценоза, а также фиксации объектов на них могут быть успешно решены в рамках квантовой ранговой динамики с помощью новых понятий альфа-функции, дифлекс-функции и волновой функции.

Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: [Изд-во «Советская Энциклопедия»], [1984]. – 944 с.
2. 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].
3. Петухов Г.Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем [Монография] / Г.Б. Петухов, В.И. Якунин. – М.: [Изд-во «АСТ»], [2006]. – 504 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ [Трактат] / О.Р. Кивчун. – Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2019]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/vran.pdf, свободный.
8. Гнатюк В.И. Критерий оценки качества электропотребления техноценоза [Статья] / В.И. Гнатюк // Новые перспективы рангового анализа. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [б.и.], [2019]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/giperkache.pdf, свободный.
9. 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.
10. Гнатюк В.И. Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению [Трактат] / В.И. Гнатюк. – Электронные данные. – Калининград: [б.и.], [2021]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf.
11. Гнатюк В.И. Знания, информация, данные в управлении СЭТ-систем [Основные понятия, термины и определения] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [б.и.], [2022]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/inf_dann_upr.pdf, свободный.