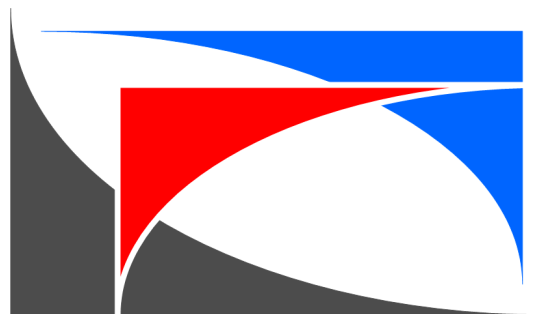


**В.И. Гнатюк**

**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТЕХНОЦЕНОЗА  
ПО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЮ**

**Трактат**



**Калининград 2021**

**Гнатюк, В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению [Трактат] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [б.и.], [2021]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf>

Предлагается дополнить концепцию интернета энергии новым понятием цифрового двойника техноценоза по электропотреблению, под которым понимается постоянно меняющийся под воздействием программного функционала техноценоза цифровой профиль, содержащий актуальное хранилище цифровых двойников электропотребления, кубированных в кортеж цифровых векторов рангов (объектов). Цифровой профиль электропотребления – набор процедур рангового анализа, ориентированных на выполнение задачи цифровизации электропотребления техноценоза. Цифровой двойник электропотребления – постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий актуальные адаптированные слои данных, являющиеся результатом циклической реализации программного функционала техноценоза на OLAP-кубе данных по электропотреблению. Цифровой слой данных техноценоза является основной горизонтальной структурной единицей OLAP-куба, под которым понимается многомерный, долговременно хранимый массив данных техноценоза по электропотреблению, используемый в процессе интерактивного анализа на платформе энергоэффективности. Программный функционал техноценоза – кортеж преобразователей и агрегаторов, предназначенных для реализации статической, динамической и бифуркационной моделей, а также процедуры обратной адаптации на OLAP-кубе данных техноценоза по электропотреблению. Основным требованием, предъявляемым к цифровизации электропотребления, является управляемость процесса потребления электроэнергии с использованием процедур интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования, а также соответствующих тонких дополнений дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализа. Преобразование OLAP-куба, при котором отдельные его двумерные слои развертываются в трехмерные кубы данных, позволяет получить четырехмерный объект, который предлагается называть тессерактом техноценоза по электропотреблению. Тессеракт данных техноценоза по электропотреблению – четырехмерный, долговременно хранимый массив данных, в котором четвертое измерение формируется за счет темпорально согласованных гиперпараметров. Ключевым в процессе управления в рамках цифровой платформы энергоэффективности выступает интеллектуальное нормирование, под которым понимается процедура оптимального управления электропотреблением техноценоза, заключающаяся в определении индивидуальных динамических норм, учитывающих статистические особенности электропотребления объектов в составе техноценоза на обозримом временном этапе.

---

© В.И. Гнатюк, 2021, <http://www.gnatukvi.ru>, [mail@gnatukvi.ru](mailto:mail@gnatukvi.ru)

## Содержание

### Введение

1. Данные по электропотреблению
2. Расчетная модель электропотребления
3. Виртуализация электропотребления
4. Концепция цифровой платформы
5. Гиперпараметрическое развертывание
6. Интеллектуальное нормирование
7. Планирование энергосбережения

### Заключение

### Список литературы

**Аннотация.** Цифровая платформа энергоэффективности представляет собой интегрированную информационно-аналитическую систему, реализующую применение параметрического цифрового двойника техноценоза в управлении электропотреблением. Однопараметрический цифровой двойник техноценоза – постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий наиболее актуальное хранилище данных по электропотреблению рангов (объектов) техноценоза. При этом в качестве способа создания цифрового двойника техноценоза выступает параметрическая виртуализация, предполагающая формирование и обработку хранилища данных по электропотреблению с использованием процедур рангового анализа.

**Ключевые слова:** техноценоз, объект, ранговый анализ, региональный электротехнический комплекс, электропотребление, ранговое параметрическое распределение, цифровая платформа энергоэффективности, цифровой двойник техноценоза, параметрическая виртуализация, параметрическая адаптация, OLAP-куб данных, гиперпараметрическое развертывание, гиперпараметр, тессеракт данных, интеллектуальное нормирование.

**Annotation.** The digital platform for energy efficiency is an integrated information and analytical system that implements the use of the parametric digital twin of technocenosis in the management of power consumption. The one-parameter digital twin of technocenosis is a constantly changing digital profile containing the most relevant data storage on the power consumption of technocenosis. At the same time, parametric virtualization acts as a way to create a digital twin of technocenosis, which involves the formation and processing of a data warehouse on power consumption using rank analysis.

**Keywords:** technocenosis, facility, rank analysis of technocenoses, rank parametric distribution, regional electrical complex, power consumption, digital energy efficiency platform, digital twin of technocenosis, parametric virtualization, parametric adaptation, OLAP data cube, data tesseract, intelligent rationing.

## **Введение** [на содержание]

Наши исследования [1-11], посвященные цифровому двойнику технoценoза по электропотреблению, а также цифровой платформе энергоэффективности, имеют отношение к бурно развивающейся в последние годы цифровой экономике. Как известно, цифровая экономика – это хозяйственная деятельность, в которой все данные содержатся в цифровой форме, что способствует созданию информационно-телекоммуникационных технологий и формированию технологической основы для социальной и экономической сферы. По устоявшемуся определению, цифровая энергетика – это элемент цифровой экономики в энергетической сфере. Бытует также мнение, что цифровая энергетика может рассматриваться как хозяйственная деятельность в энергетической сфере, в которой все данные содержатся в цифровой форме. Следовательно, сутью цифровой энергетики является преобразование производственных, экономических и иных отношений в сфере производства, передачи, а также потребления энергии на основе новейших цифровых подходов и средств автоматизации [12].

Для нас интересен ряд тезисов, касающихся сути цифровой энергетике и изложенных в книге Д.В. Холкина «Люди цифры. Шесть взглядов на новую энергетике» [12]. Вот некоторые из них: основное содержание цифровой энергетике, как части цифровой экономики, тяготеет к понятию «экономика»; важнейшая задача цифровой энергетике заключается в компенсации резко возрастающих издержек транзакций; проект в цифровой энергетике всегда связан с новой площадкой взаимодействия экономических субъектов; ключевую роль в цифровой энергетике играют модели процессов производства, передачи и потребления энергии; цифровизация не сводится лишь к применению современных цифровых информационно-коммуникационных средств; в основе цифровизации лежат методики, описывающие процессы функционирования потребителей энергии; цифровизация всегда связана с созданием цифровых платформ взаимодействия энергетике с потребителями; цифровизация ведет к освобождению человека от рутины, сохраняя его достойную роль в технической реальности.

В этом контексте следует отметить, что концепция цифровой энергетике, разрабатываемая в настоящее время электроэнергетическими компаниями и направленная на цифровую трансформацию отрасли, представляется несколько ограниченной. Дело в том, что в этой концепции ставятся задачи повышения надежности электроснабжения, наращивания уровня технического состояния производственных фондов электроэнергетике, а также снижения аварийности в энергосистемах. Как следствие, основной упор делается на техническое оснащение энергосистем цифровыми средствами измерения, телекоммуникации и автоматизации. При этом в значительной степени за кадром остаются вопросы создания принципиально но-

вых цифровых платформ, обеспечивающих эффективное взаимодействие энергосистем с потребителями электроэнергии. Поэтому настоящий материал разрабатывался в основном в интересах потребителей электроэнергии в рамках целевой установки по созданию теоретических предпосылок построения современной цифровой платформы энергоэффективности.

Весьма интересной представляется концепция Интернета энергии, разработанная в последние годы группой НТИ «Энерджинет» [12]. Разработчики данной концепции полагают, что «электроэнергетические системы, построенные по традиционной централизованной архитектуре, к настоящему моменту практически полностью исчерпали свой ресурс эффективности. На них оказывают существенное давление новые вызовы времени: быстрое изменение характера спроса потребителей, рост издержек и снижение собственной экономической эффективности, энергетический переход, необходимость эффективной электрификации и освоения новых территорий. Эти вызовы в различных сочетаниях стоят перед электроэнергетиками разных стран по всему миру, а проблема исчерпания ресурса эффективности централизованной энергетики является всеобщей. Для ответа на эти вызовы требуется новая архитектура электроэнергетических систем – архитектура Интернета энергии» [12].

Интернет энергии – децентрализованная электроэнергетическая система, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее пользователями. Энергетическая транзакция – акт технического и экономического взаимодействия между пользователями и их оборудованием, при котором осуществляется согласованное управление параметрами работы этого оборудования, за счет чего один из пользователей приобретает некоторое полезное качество, ценность, а другой пользователь получает оплату за эту ценность. Энергетическая транзакция представляет собой единство трех взаимодействий между пользователями и их оборудованием: финансово-договорного, информационно-управляющего и электрического [12].

Пользователями Интернета энергии могут быть владельцы любого электроэнергетического оборудования, которое может производить (генерировать), накапливать (аккумулировать) и потреблять электроэнергию, а также субъекты, оказывающие владельцам электроэнергетического оборудования различные услуги. Пулы электроэнергетического оборудования пользователей Интернета энергии, имеющего общую точку присоединения к электрическим сетям и информационным каналам, обеспечивающим связь с Интернетом энергии, образуют структурную единицу Интернета энергии – энергетическую ячейку. Интернет энергии представляет собой сеть энергетических ячеек и обеспечивает их связь и взаимодействие друг с другом. В целях роботизированного оказания и получения услуг пользователи Интернета энергии обращаются к приложениям – сервисным программам, самостоятельно выстраивающим взаимодействие между энерге-

тическими ячейками за счет формирования наборов энергетических транзакций для реализации тех или иных услуг [12]. Неоспоримым достоинством новой концепции Интернета энергии является высокая технико-экономическая эффективность, а также устойчивость производства и передачи электроэнергии. Однако, на наш взгляд, здесь вновь за кадром остается ключевая задача потребителя электроэнергии, заключающаяся в повышении энергоэффективности питаемых электроэнергией технологических процессов и гибкой управляемости процесса электропотребления.

Итак, цифровизация в электроэнергетике обязательно предполагает создание принципиально новых цифровых платформ, обеспечивающих, с одной стороны, устойчивое функционирование энергосетевого комплекса, а с другой – дифлексируемый, прогнозируемый, нормируемый и потенцируемый процесс электропотребления, реализуемый с максимальной энергоэффективностью и минимумом потерь. Отсюда – задачами цифровизации электропотребления, прежде всего, являются: повышение энергоэффективности технологических процессов, гибкая управляемость потребления электроэнергии, устойчивость электроснабжения за счет режимного нормирования, а также снижение затрат на управление, экономические транзакции и всестороннее обеспечение. Цифровизация электропотребления обязательно должна обеспечивать индивидуальный приборный учет, гибкую тарификацию, сменяемость провайдера, гарантированную генерацию и когенерацию, а также режимное нормирование.

Ключевым требованием, предъявляемым к цифровизации электропотребления, является управляемость процесса потребления электроэнергии с использованием процедур интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования. При необходимости, должна быть обеспечена возможность реализации тонких процедур рангового анализа: дифлекс-анализа (в процессе интервального оценивания), GZ-анализа (в процессе прогнозирования), ASR-анализа (в процессе нормирования) и ZP-анализа (в процессе потенцирования). Важно, чтобы при управлении электропотреблением у пользователя была возможность реализовывать процедуры МС-прогнозирования, ДС-анализа и режимного нормирования, что позволит учесть внутренние и внешние управляющие воздействия. А учет техноэкономического критерия эффективности должен позволять на основе долгосрочного моделирования осуществлять выбор стратегии, позволяющей исчерпывать системный потенциал энергосбережения в установленные сроки и с минимальными затратами. Работа цифровой платформы должна сопровождаться постоянным мониторингом коэффициентов конверсии, а также дифлекс- и дамадж-параметров. Это позволит всегда иметь детальную оперативную информацию о близости системы и объектов к нижней границе области допустимых значений электропотребления, накопленных затратах, а также показателях качества электропотребления и ущербе от неэффективного расходования электроэнергии.

Очевидно, что к цифровым платформам, создаваемым в области электропотребления, должны предъявляться и общие требования, характерные для любого программного обеспечения. По Карлу Вигерсу их, весьма условно, можно разбить на четыре группы: бизнес-требования, пользовательские, системные и функциональные требования. Если выходить за рамки функционального подхода, прежде всего, целесообразно обращать внимание на следующее: кроссплатформенность, мобильность, защищенность, надежность, безопасность, юзабилити и дизайн.

## 1. Данные по электропотреблению [на содержание]

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) (см. [10]).



Рис. 1. Региональный электроэнергетический комплекс

С методологической точки зрения, рассматривая региональный электроэнергетический комплекс, в котором, как и в любой электрической цепи, реализуется единый процесс производства, передачи и потребления электроэнергии, мы имеем дело с двумя разными предметными областями. Первая рассматривает объект исследования как систему электроснабжения, где в качестве базовой выступает теория электрических цепей. Вторая предметная область изучает объект исследования как взаимосвязанную совокупность потребителей электроэнергии, т.е. техноценоз. Научная проблема, связанная с нашим многолетним практическим воплощением закона оптимального построения техноценозов (см. [3]) в области исследования региональных электротехнических комплексов, заключается в разработке теории оптимального управления электропотреблением, в основе которой лежит методология рангового анализа техноценозов (см. [10]).

Очевидно, что в теории оптимального управления электропотреблением техноценозов, собственно понятие «электропотребление» занимает центральное место, однако, в его толковании имеется ряд проблем. Сразу отметим, что электропотребление, в зависимости от контекста, может рассматриваться как показатель, как параметр и/или процесс (см. [здесь](#)).

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

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



госбытовые компании зачастую называют этот параметр «расход электроэнергии», однако, с точки зрения потребителя – это не «расход», а «потребление электроэнергии», т.е., не что иное, как «электропотребление».

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

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

## **2. Расчетная модель электропотребления**

[\[на содержание\]](#)

Как известно [1-10], основным методом исследования и оптимального управления региональными электротехническими комплексами является ранговый анализ – метод исследования больших технических систем (техноценозов), имеющий целью их статистический анализ, а также оптимизацию, моделирование и управление. Состоит из трех разделов, первый из которых – функциональный ранговый анализ – полагает в качестве основного критерия форму видовых и ранговых распределений [10]. Второй раздел – комбинаторный ранговый анализ – основан на свойствах, отношениях, а также закономерностях ранговых конфигураций и структур [8]. Важным инструментом третьего раздела – векторного рангового анализа – выступает векторная мера параметрической близости в ранговом параметрическом пространстве [9]. Функциональный ранговый анализ включает

стандартные процедуры параметрического нормирования, интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования потребления ресурсов. Более тонкий анализ рангового параметрического распределения позволяет существенно повысить эффективность рангового анализа. Он осуществляется в рамках «тонких» процедур: дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования), ASR-анализа (нормирования) и ZP-анализа (потенцирования) (см. [10]).

В рамках функционального рангового анализа центральное место занимает понятие распределения, под которым, в самом общем случае, понимается расположение элементов подмножества внутри множества. В математике рассматриваются статистические и вероятностные распределения. Как правило, исследователь начинает работу с построения статистического распределения, которое возникает при эмпирическом описании выборки конечного объема из генеральной совокупности. Следовательно, оно всегда дискретно на множестве значений случайной величины. Как идеализация статистического распределения в ситуации, когда объем выборки из генеральной совокупности стремится к бесконечности, возникает непрерывное вероятностное распределение (см. [здесь](#)).

Ключевым моментом в методологии рангового анализа являются понятия негауссовости и ципфовости гиперболических распределений. Вероятностное распределение мы называем гауссовым, если для него выполняется центральная предельная теорема: при широких предположениях относительно законов распределения независимых случайных величин с ростом числа слагаемых закон распределения суммы этих величин неограниченно приближается к нормальному. Статистическое распределение называется гауссовым, если зависимость его среднего и дисперсии от объема выборки незначительна, т.е. выполняется закон больших чисел: при достаточно большом числе независимых испытаний среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины сходится по вероятности к ее математическому ожиданию. Очевидно, что, в общем случае, любое вероятностное или статистическое распределение, для которого не выполняется хотя бы одно из условий, является негауссовым (см. [здесь](#)).

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

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

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

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

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

К настоящему времени на обширном статистическом материале в различных областях показана одновременно устойчивость и негауссовость ранговых параметрических распределений техноценозов [1-10]. Следовательно, для их статистического описания особое значение имеет распределение Ципфа с  $\alpha < 2$ , которое удовлетворяет известной предельной теореме Гнеденко – Деблина. В теореме доказывается, что для сходимости распределений нормированных сумм одинаково распределенных независимых случайных величин к устойчивым распределениям, отличным от нормального, необходимо и достаточно, чтобы при  $w \rightarrow \infty$  наблюдалась асимптотическая, сильная эквивалентность функций (см. [здесь](#)):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$x_p = (P(W > W(x_p))) \cdot n, n \rightarrow \infty, \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{D}{W_0^2} = \frac{\int_0^{W_m/W_0} (y - (M/W_0))^2 y^{-(1+\alpha)} dy}{\int_0^{W_m/W_0} y^{-(1+\alpha)} dy},$$
(8)

- где
- $M$  – первый центральный момент (математическое ожидание) распределения случайной величины  $W$ ;
  - $D$  – второй центральный момент (дисперсия) распределения случайной величины  $W$  (корень из дисперсии – среднее квадратичное отклонение);
  - $y$  – формальная переменная интегрирования.

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

Итак, любое статистическое распределение случайной величины можно описать (в более строгом смысле – аппроксимировать) вероятностным распределением. Для этого можно использовать как частотную форму распределения, так и ранговую. Однако для описания гауссовых распределений традиционно принято использовать частотную форму (плотность

вероятности и функцию распределения), т.к. они позволяют получить и в дальнейшем использовать при моделировании устойчивые значения центральных моментов распределения. Для негауссовых статистических выборок случайных величин также можно построить распределения в частотной форме и рассчитать соответствующие моменты. Однако, ввиду существенной зависимости последних от объема выборки, использовать их при моделировании представляется невозможным. Следовательно, негауссовые выборки следует аппроксимировать вероятностными распределениями в ранговой форме, параметры которых, в отличие от моментов, в пределах одной генеральной совокупности ведут себя устойчиво.

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

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

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

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

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

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

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

где  $\{R_k\}_{k=1}^n$  – множество возможных рангов объектов;  
 $f: W \rightarrow R$  – числовая функция, устанавливающая соответствие между элементами множеств.

Здесь имеет смысл отвлечься и рассмотреть подробнее понятие объекта техноценоза, под которым в узком смысле понимается пространственно-технологический кластер, подсистема техноценоза, взаимосвязанная, отграниченная и обладающая целостностью с точки зрения общности управления, технологии, территории, потребления ресурсов (в данном случае – электропотребления). Как правило, в качестве объектов в региональном электротехническом комплексе (как техноценозе) определяются четко фиксируемые в оргштатной структуре подразделения, имеющие свою систему управления (и всестороннего обеспечения), а также точки фиксации электропотребления. По сути, объекты техноценоза в данном случае выступают в качестве потребителей электроэнергии, под которыми формально понимаются лица (физические или юридические), приобретающие электрическую энергию для собственных бытовых и/или производственных нужд. Однако в составе каждого потребителя также имеются более мелкие подразделения (как правило, не являющиеся юридическими лицами), зачастую со своей усеченной системой управления и индивидуальным учетом электропотребления. Данные подразделения более низкого уровня, с точки зрения электропотребления, состоят из зданий, сооружений и технических систем, в составе которых функционирует огромное количество приемников электроэнергии – функционально законченных систем, предназначенных для преобразования электроэнергии в другие виды энергии. Важно учитывать, что приемники электроэнергии уже не имеют своей индивидуальной системы управления и всестороннего обеспечения, а также у них, как правило, отсутствует индивидуальный учет электропотребления. И даже если учет, все же, имеется (в последнее время появляется достаточно много, так называемых, «умных» приемников электроэнергии), то,



ввиду отсутствия системы управления, полученные данные ассоциируются с электропотреблением на более высоком оргштатном уровне (на уровне потребителей). В свою очередь, приемники электроэнергии делятся на подсистемы (технические системы, цепи, узлы, агрегаты, детали и т.д.), часть из которых специально предназначена для преобразования электроэнергии в другие виды энергии, а часть – выполняет иные функции (тем не менее, зачастую также преобразуя электроэнергию). В подобном разбиении целого на части можно бесконечно двигаться дальше вплоть до фундаментальных участников процесса электропотребления – элементарных частиц и полей, из которых состоят все объекты окружающего материального мира (в т.ч. и подсистемы приемников) (см. [здесь](#)).

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

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

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

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

где  $W_\Sigma$  – суммарное электропотребление техноценоза.

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

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

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

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

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

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

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

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

Заметим, что в аксиоме булеана указан лишь тип подмножеств множества  $\{W\}^{N=0}$ , которые должны быть элементами образуемого множества  $\{W_d\}^{N=1}$ . Что касается различия в мощности самого множества  $\{W\}^{N=0}$  и множества его подмножеств  $\{W_d\}^{N=1}$ , то здесь сошлемся на классическое утверждение теории множеств – теорему Кантора, которая утверждает, что любое множество  $\{W\}^{N=0}$  менее мощно, чем множество всех его подмножеств  $\{W_d\}^{N=1}$ . Кроме того, руководствуясь аксиомой объемности, можно доказать единственность булеана для каждого множества значений электропотребления техноценоза  $\{W\}^{N=0}$ . Вместе с тем, аксиома булеана не содержит алгоритм нахождения всех элементов образуемого множества  $\{W_d\}^{N=1}$ . С учетом выражений (4), (5), (9) и (10) имеем:

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

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

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

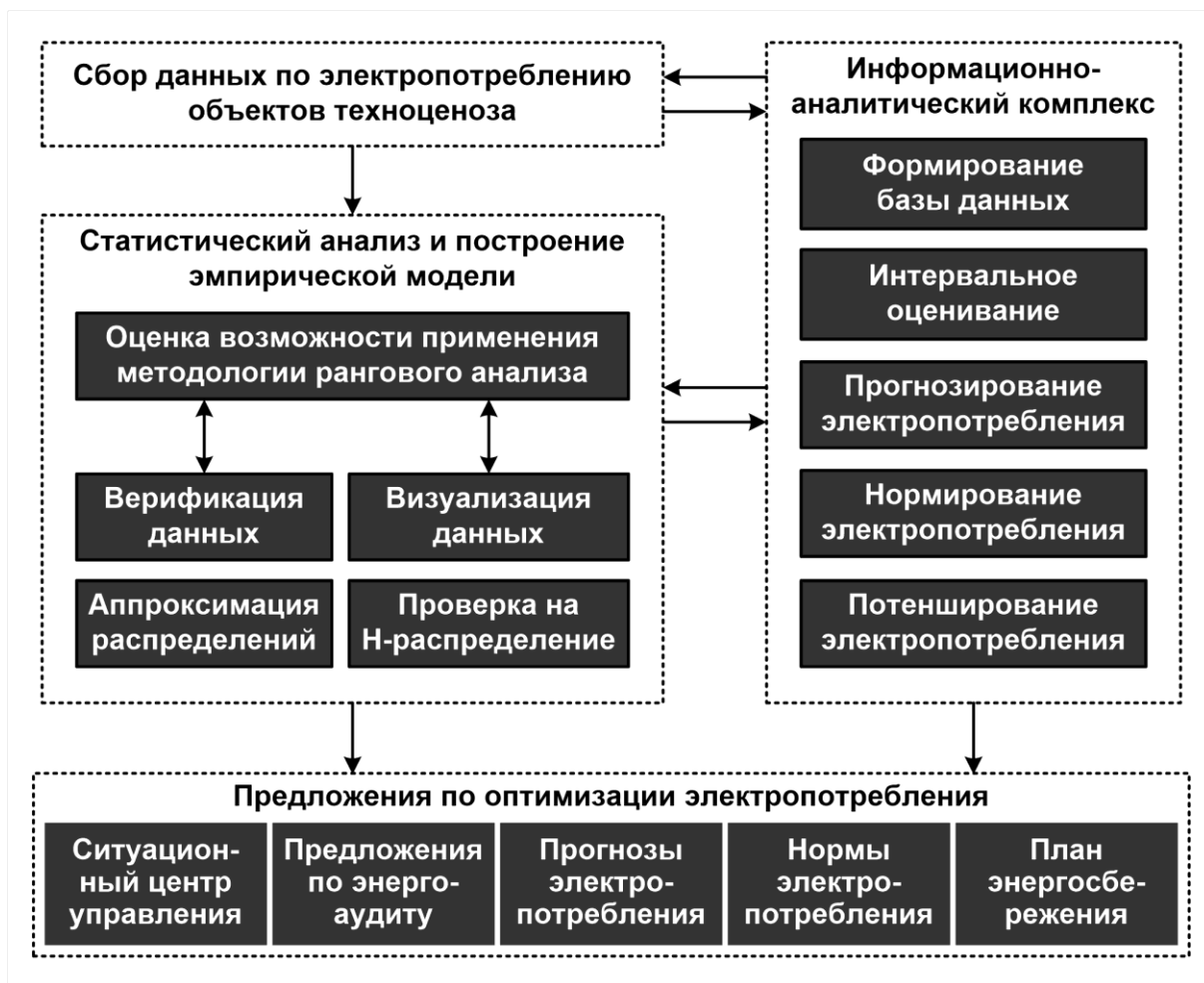


Рис. 2. Статическая модель электропотребления техноценоза (см. [10])

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

ботку ZP-плана электропотребления техноценоза и состоящая из этапов ZP-нормирования, ZP-планирования, а также мониторинга конверсии.

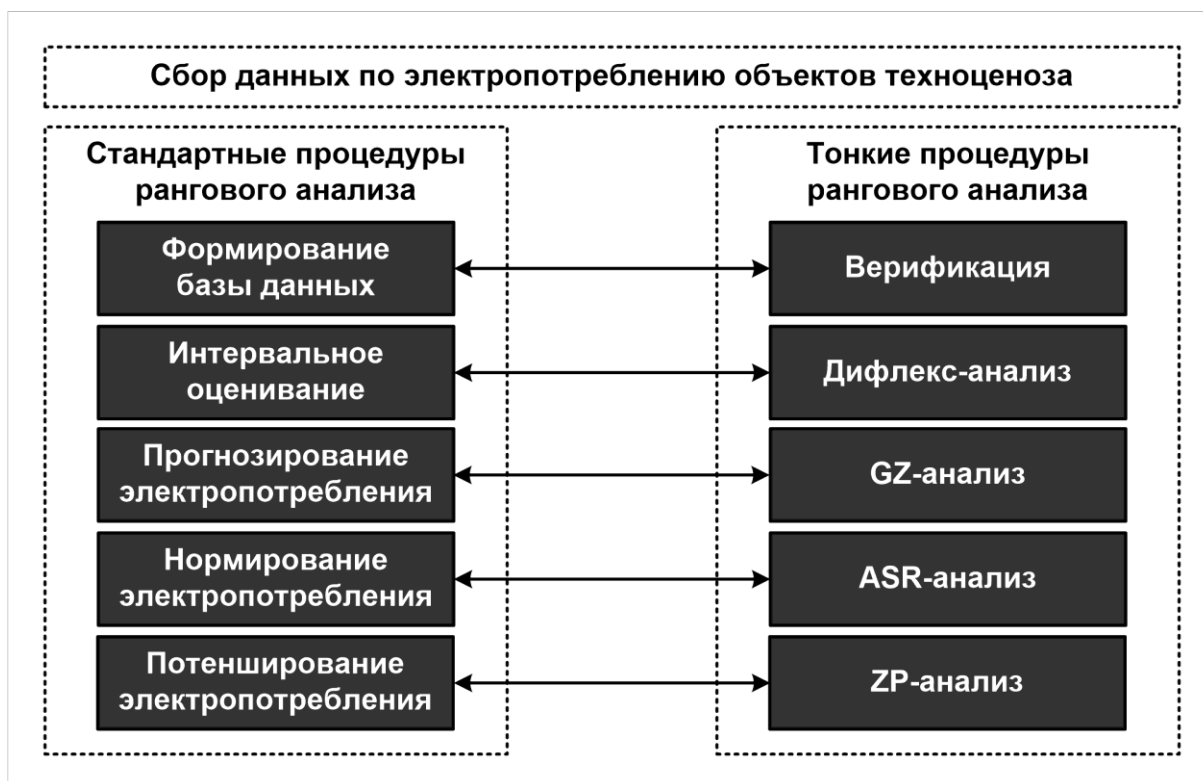


Рис. 3. Тонкие процедуры рангового анализа (см. [10])

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

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

внешних управляющих воздействий, и это потребовало дальнейшего развития нашей теории уже на очередном четвертом этапе [10].

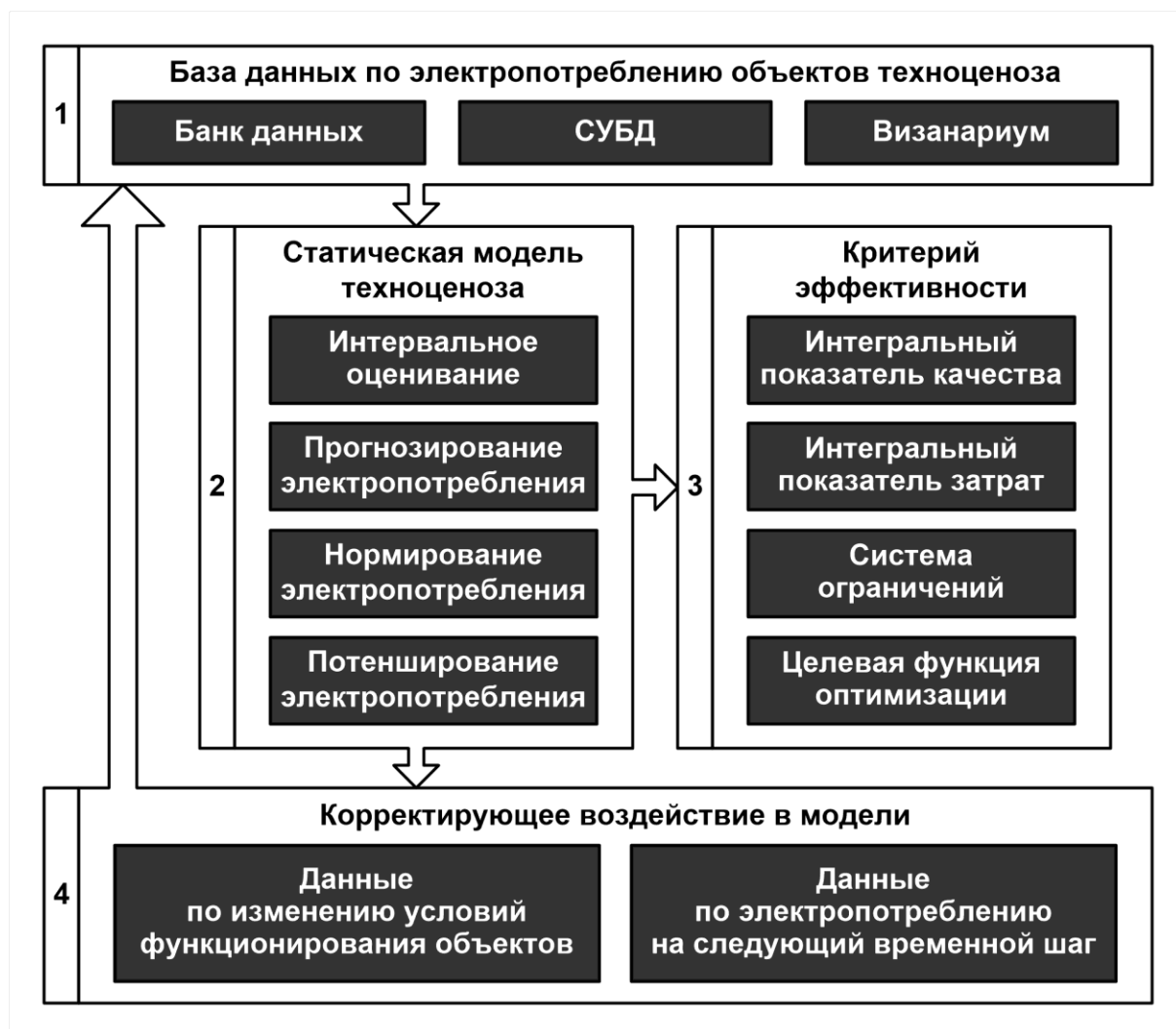


Рис. 4. Динамическая модель электропотребления техноценоза (см. [10])

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

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

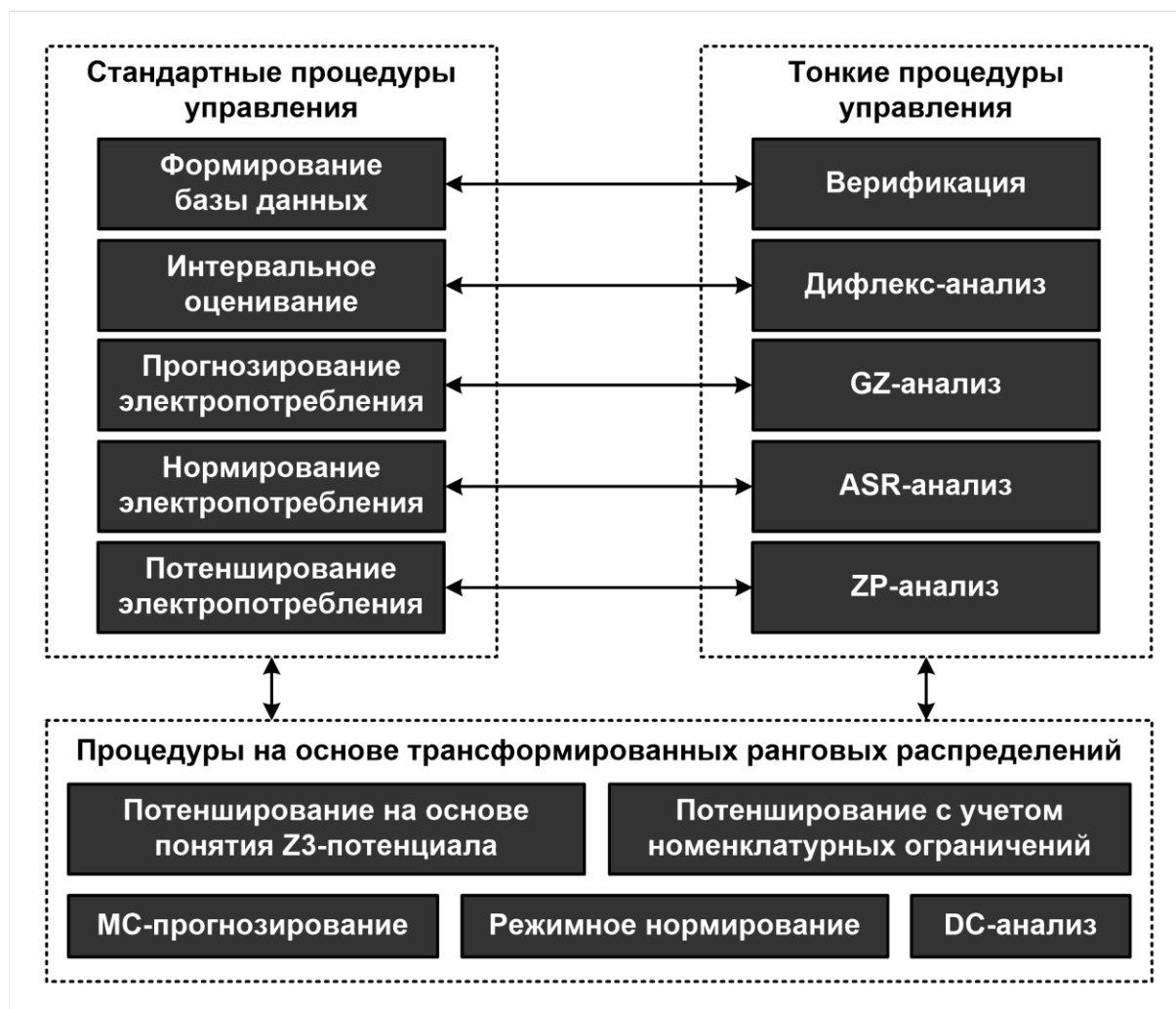


Рис. 5. Бифуркационная модель электропотребления (см. [10])

### 3. Виртуализация электропотребления

[\[на содержание\]](#)

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

ски ранговое параметрическое распределение по электропотреблению представляет собой числовую функцию, определенную на множестве ранговой топологической меры, полученную в результате аппроксимации отранжированного множества значений электропотребления объектов (как правило, приемников или потребителей) техноценоза (см. [здесь](#)):

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_k^{\text{RAW}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Verific}} \{W_k^{\text{VER}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{VER}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Rangin}} \{W_k^{\text{RAN}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{RAN}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Approx}} \{W_k^{\text{APP}}\}_{k=1}^n, \end{array} \right. \quad (18)$$

где  $\{W_k^{\text{RAW}}\}_{k=1}^n$  – множество «сырых» значений электропотребления;  
 $\{W_k^{\text{VER}}\}_{k=1}^n$  – множество верифицированных значений;  
 $\{W_k^{\text{RAN}}\}_{k=1}^n$  – множество отранжированных значений;  
 $\{W_k^{\text{APP}}\}_{k=1}^n$  – множество аппроксимированных значений.

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

Здесь следует дать ряд определений (см. [здесь](#)). Под хранилищем данных по электропотреблению понимается предметно-ориентированная информационная база данных техноценоза, используемая для поддержки



принятия решений в рамках цифровой платформы энергоэффективности. Цифровая платформа энергоэффективности – интегрированная информационно-аналитическая система, реализующая применение параметрического цифрового двойника в управлении, что позволяет повысить качество на всех этапах процесса электропотребления. Однопараметрический цифровой двойник техноценоза – постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий наиболее актуальное хранилище данных по электропотреблению рангов (объектов) техноценоза. Параметрическая виртуализация – способ создания цифрового двойника техноценоза, предполагающий формирование и обработку хранилища данных с использованием процедур рангового анализа (рис. 6). Основной структурной единицей хранилища выступает цифровой слой данных, под которым понимается плоская структура данных (как правило, двумерный массив), хранящая идентифицируемый по индексу и/или рангу (первое измерение), а также номеру временного интервала (второе измерение), набор параметров (как правило, всех объектов техноценоза), являющихся результатом цикличной реализации программного функционала техноценоза на OLAP-кубе данных по электропотреблению. Цифровой слой данных техноценоза является основной горизонтальной структурной единицей OLAP-куба ([см. здесь](#)).

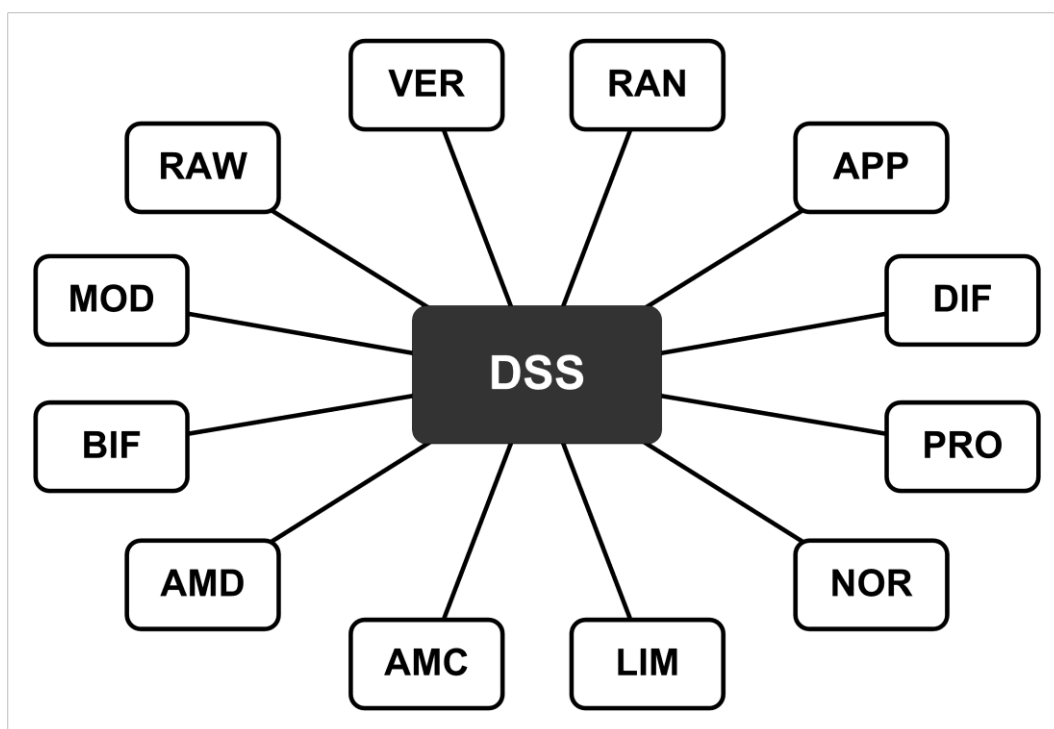


Рис. 6. Состав хранилища данных техноценоза:  
DSS (Decision Support System) – система  
поддержки принятия решений (СППР)

В хранилище данных по электропотреблению входят следующие основные цифровые слои данных (см. рис. 2 – 5): [RAW] – «сырые» данные, загруженные с приборов учета; [VER] – верифицированные данные, являющиеся результатом процедуры верификации слоя «сырых» данных; [RAN] – отранжированные верифицированные данные; [APP] – аппроксимированные данные, полученные как ранговые проекции эмпирических верифицированных данных на аппроксимационном ранговом параметрическом распределении; [DIF] – дифлекс-параметры как результат применения процедур интервального оценивания и дифлекс-анализа применительно к одному из первых четырех слоев; [PRO] – инерционный прогноз как результат прогнозирования и GZ-анализа; [NOR] – нормы электропотребления как результат нормирования и ASR-анализа; [LIM] – лимиты электропотребления как результат процедур потенцирования и ZP-анализа; [AMC] – добавочный ресурс MC-ценоза как результат выполнения процедуры MC-прогнозирования; [AMD] – добавочный ресурс DC-ценоза как результат DC-анализа; [BIF] – добавочный ресурс бифуркации как результат анализа бифуркаций; [MOD] – модельные данные как результат выпуклого анализа и моделирования на среднесрочную перспективу.

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

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

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

Математическое описание вводимого понятия цифрового слоя данных техноценоза по электропотреблению представлено ниже в (19).

Цифровой слой данных техноценоза по параметру электропотребления:

$$\langle W_{kt}^{OLAP} \rangle \xrightarrow[\substack{k=1..n \\ t=1..\tau}]{p=fix} \left\langle \begin{matrix} [RAW]_{kt} & [DIF]_{kt} & [IPK]_{kt} & [AMC]_{kt} & [DAM]_{kt} \\ [VER]_{kt} & [PRO]_{kt} & [IPZ]_{kt} & [AMD]_{kt} & [VRO]_{kt} \\ [RAN]_{kt} & [NOR]_{kt} & [IPE]_{kt} & [BIF]_{kt} & [VRR]_{kt} \\ [APP]_{kt} & [LIM]_{kt} & [DFU]_{kt} & [MOD]_{kt} & [VOT]_{kt} \end{matrix} \right\rangle; \quad (19)$$

двумерный массив цифрового слоя данных по электропотреблению:

$$[W_{kt}^{RAN}] \xrightarrow[\substack{k=1..n \\ t=1..\tau}]{} \begin{bmatrix} W_{11}^{RAN} & W_{12}^{RAN} & W_{13}^{RAN} & \dots & W_{1j}^{RAN} & \dots & W_{1\tau}^{RAN} \\ W_{21}^{RAN} & W_{22}^{RAN} & W_{23}^{RAN} & \dots & W_{2j}^{RAN} & \dots & W_{2\tau}^{RAN} \\ W_{31}^{RAN} & W_{32}^{RAN} & W_{33}^{RAN} & \dots & W_{3j}^{RAN} & \dots & W_{3\tau}^{RAN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{i1}^{RAN} & W_{i2}^{RAN} & W_{i3}^{RAN} & \dots & W_{ij}^{RAN} & \dots & W_{i\tau}^{RAN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1}^{RAN} & W_{n2}^{RAN} & W_{n3}^{RAN} & \dots & W_{nj}^{RAN} & \dots & W_{n\tau}^{RAN} \end{bmatrix},$$

где  $\langle W_{kt}^{OLAP} \rangle$  – кортеж OLAP-куба данных;  $[W_{kt}^{RAN}]$  – двумерная матрица цифрового слоя ранжированных данных по электропотреблению (в выражении в качестве примера приведен слой RAN – ранжированных данных);  $W_{kt}^p$  – значение параметра, соответствующее k-му рангу на t-ом временном интервале в p-ом слое данных; p – идентификатор слоя данных (в данном выражении  $p = RAN$ ); k – ранг (n – общее количество объектов техноценоза); t – интервал времени ( $\tau$  – общее количество интервалов модельного времени).

На основе особым образом организованного хранилища данных может быть сформирован OLAP-куб – многомерный, долговременно хранимый массив данных техноценоза по электропотреблению, используемый в процессе интерактивного анализа энергоэффективности (рис. 7). Подобный инструмент может быть реализован на основе универсальных реляционных СУБД или в рамках специализированного программного обеспечения. Индексам массива соответствуют измерения или оси куба, а значениям элементов массива – так называемые, меры куба. В отличие от обычного массива в языках программирования, доступ к элементам OLAP-куба

может осуществляться как по полному набору индексов (измерений), так и по их подмножеству. При этом результатом будет не один элемент, а их множество, являющееся аргументом агрегирующей функции (см. [здесь](#)).

Ранг	Данные слоя OLAP-куба техноценоза по электропотреблению										
	...	1	2	3	4	5	6	.....	t	.....	$\tau$
1	...	$W_{11}$	$W_{12}$	$W_{13}$	$W_{14}$	$W_{15}$	$W_{16}$	.....	$W_{1t}$	.....	$W_{1\tau}$
2	...	$W_{21}$	$W_{22}$	$W_{23}$	$W_{24}$	$W_{25}$	$W_{26}$	.....	$W_{2t}$	.....	$W_{2\tau}$
3	...	$W_{31}$	$W_{32}$	$W_{33}$	$W_{34}$	$W_{35}$	$W_{36}$	.....	$W_{3t}$	.....	$W_{3\tau}$
4	...	$W_{41}$	$W_{42}$	$W_{43}$	$W_{44}$	$W_{45}$	$W_{46}$	.....	$W_{4t}$	.....	$W_{4\tau}$
5	...	$W_{51}$	$W_{52}$	$W_{53}$	$W_{54}$	$W_{55}$	$W_{56}$	.....	$W_{5t}$	.....	$W_{5\tau}$
.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
k	...	$W_{k1}$	$W_{k2}$	$W_{k3}$	$W_{k4}$	$W_{k5}$	$W_{k6}$	.....	$W_{kt}$	.....	$W_{k\tau}$
.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
n-1	...	$W_{(n-1)1}$	$W_{(n-1)2}$	$W_{(n-1)3}$	$W_{(n-1)4}$	$W_{(n-1)5}$	$W_{(n-1)6}$	.....	$W_{(n-1)t}$	.....	$W_{(n-1)\tau}$
n	...	$W_{n1}$	$W_{n2}$	$W_{n3}$	$W_{n4}$	$W_{n5}$	$W_{n6}$	.....	$W_{nt}$	.....	$W_{n\tau}$

Рис. 7. OLAP-куб данных техноценоза по параметру электропотребления:  $W_{kt}$  – обобщенное обозначение расчетного параметра, составляющего соответствующий слой данных OLAP-куба; k – ранг (n – общее количество объектов техноценоза); t – интервал времени ( $\tau$  – общее количество фиксируемых интервалов модельного времени)

Математическое описание вводимого понятия OLAP-куба данных техноценоза по электропотреблению представлено ниже в (20). Кубирование данных как способ создания, долговременного хранения, а также интерактивного анализа многомерного массива данных техноценоза по электропотреблению в форме OLAP-куба, помимо формирования хранилища данных по электропотреблению, предполагает создание и постоянную реализацию, так называемых, агрегаторов данных. В выражении (20) представлены первичные и вторичные агрегаторы, осуществляющие взаимодействие между первичными и вторичными слоями хранилища данных (первой, второй и третьей очереди). Дополнительно к описанным выше здесь добавляются следующие вторичные слои: [POT] – потенциалы энергосбережения объектов; [IPK] – интегральные показатели качества; [IPZ] –

интегральные показатели затрат; [IPE] – интегральные показатели эффективности; [DFU] – дифлекс-углы объектов; [DAM] – дамадж-параметры объектов; [PLN] – показатели конверсии объектов техноценоза.

Параметрический OLAP-куб данных техноценоза по электропотреблению:

$$\left\langle W_{kt}^{OLAP} \right\rangle \xrightarrow[t=1..t]{k=1..n} \left\langle \begin{matrix} [RAW]_{kt} & [DIF]_{kt} & [IPK]_{kt} & [AMC]_{kt} & [DAM]_{kt} \\ [VER]_{kt} & [PRO]_{kt} & [IPZ]_{kt} & [AMD]_{kt} & [VRO]_{kt} \\ [RAN]_{kt} & [NOR]_{kt} & [IPE]_{kt} & [BIF]_{kt} & [VRR]_{kt} \\ [APP]_{kt} & [LIM]_{kt} & [DFU]_{kt} & [MOD]_{kt} & [VOT]_{kt} \end{matrix} \right\rangle; \quad (20)$$

первичные агрегаторы OLAP-куба:      вторичные агрегаторы OLAP-куба:

$$\left\{ \begin{array}{l} w : \{ [RAW], [VER], [RAN] \} \rightarrow [APP]; \\ w : \{ [VER], [RAN], [APP] \} \rightarrow [DIF]; \\ w : \{ [VER], [RAN], [APP] \} \rightarrow [PRO]; \\ w : \{ [VER], [RAN], [APP] \} \rightarrow [NOR]; \\ w : \{ [VER], [DIF], [PRO] \} \rightarrow [LIM]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [PRO] \} \rightarrow [AMC]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [PRO] \} \rightarrow [AMD]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [PRO] \} \rightarrow [BIF]; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} w : \{ [APP], [DIF], [PRO] \} \rightarrow [POT]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [POT] \} \rightarrow [IPK]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [POT] \} \rightarrow [IPZ]; \\ w : \{ [APP], [IPK], [IPZ] \} \rightarrow [IPE]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [IPE] \} \rightarrow [DFU]; \\ w : \{ [APP], [DIF], [IPE] \} \rightarrow [DAM]; \\ w : \{ [APP], [IPE], [DAM] \} \rightarrow [PLN]; \\ w : \{ [DFU], [DAM], [PLN] \} \rightarrow [MOD], \end{array} \right.$$

где  $\left\langle W_{kt}^{OLAP} \right\rangle$  – кортеж OLAP-куба данных;  $w : \{ [S1], [S2] \} \rightarrow [S3]$  – агрегатор двух первичных слоев [S1] и [S2] во вторичный [S3]; p – идентификатор слоя данных (RAW, VER, RAN, APP, DIF и т.д.); k – ранг (n – общее количество объектов техноценоза); t – интервал времени (τ – общее количество интервалов модельного времени).

В OLAP-кубе данных по электропотреблению можно выделить ряд структурных элементов, в частности: цифровой двойник техноценоза, цифровой вектор ранга (объекта), цифровой срез техноценоза, цифровой двойник ранга техноценоза, цифровой двойник объекта техноценоза.

Цифровой двойник техноценоза – постоянно меняющийся под воздействием программного функционала цифровой профиль, содержащий актуальное хранилище цифровых двойников электропотребления, кубированных в кортеж цифровых векторов рангов (объектов) (21). При этом под программным функционалом техноценоза понимается кортеж преобразователей и агрегаторов, предназначенных для реализации статической, ди-

намической и бифуркационной моделей, а также процедуры обратной адаптации на OLAP-кубе данных техноценоза по электропотреблению.

Цифровой двойник техноценоза по параметру электропотребления в виде кортежа кортежей транзактов рангов (объектов) по электропотреблению:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{k=1; t=1..\tau} \langle \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{PO}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{SM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{DM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{BM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{DA}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{KL}} \rangle \rangle; \\
 \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{k=2; t=1..\tau} \langle \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{PO}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{SM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{DM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{BM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{DA}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{KL}} \rangle \rangle; \\
 \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{k=3; t=1..\tau} \langle \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{PO}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{SM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{DM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{BM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{DA}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{KL}} \rangle \rangle; \\
 \dots \dots \dots \\
 \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{k=j; t=1..\tau} \langle \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{PO}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{SM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{DM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{BM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{DA}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{KL}} \rangle \rangle; \\
 \dots \dots \dots \\
 \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{k=n; t=1..\tau} \langle \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{PO}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{SM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{DM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{BM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{DA}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{KL}} \rangle \rangle;
 \end{array} \right. \quad (21)$$

кортежа цифровых векторов рангов (объектов) по электропотреблению:

$$\langle \mathbf{W}_t^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{t=1..\tau} \langle \langle \mathbf{W}_{1t}^{\text{VEC}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{2t}^{\text{VEC}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{3t}^{\text{VEC}} \rangle, \dots, \langle \mathbf{W}_{jt}^{\text{VEC}} \rangle, \dots, \langle \mathbf{W}_{nt}^{\text{VEC}} \rangle \rangle,$$

где  $\langle \mathbf{W}_t^{\text{OLAP}} \rangle$  – кортеж OLAP-куба данных техноценоза на t-ом временном интервале;  $\langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{OLAP}} \rangle$  – кортеж транзакта k-го ранга на t-ом временном интервале;  $\langle \mathbf{W}_{kt}^s \rangle$  – кортеж s-ой группы слоев куба k-го ранга на t-ом временном интервале (PO, SM, DM, BM, DA, KL);  $\langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{VEC}} \rangle$  – цифровой вектор k-го ранга на t-ом интервале времени.

В выражении (21) слои цифрового двойника техноценоза объединены в следующие группы: PO – предварительной обработки данных по электропотреблению (загрузка, форматирование, верификация, ранжирование, аппроксимация); SM – статического моделирования (интервальное оценивание, дифлекс-анализ, прогнозирование, GZ-анализ, нормирование, ASR-анализ); DM – динамического моделирования (учет обратных связей, выпуклый анализ, имитационное моделирование); BM – бифуркационного моделирования (МС-прогнозирование, DC-анализ, режимное нормирование); DA – динамической адаптации данных (верификация, проверка оши-

бок прогнозирования, обратная адаптация); KL – планирования мероприятий по энергосбережению (потенширование, ZP-анализ).

Цифровой вектор ранга (объекта) – кортеж транзактов, содержащий актуальные адаптированные данные по электропотреблению ранга (объекта), являющиеся результатом цикличной реализации программного функционала техноценоза на OLAP-кубе данных. Цифровой вектор содержит, по сути, всю актуальную информацию, касающуюся ранга и/или объекта техноценоза на данный момент времени. При необходимости, посредством ключевого поля, связывающего между собой ранги с индексами объектов, можно выстраивать информацию всех слоев цифрового вектора только относительно ранга или только объекта. Следует иметь в виду, что цифровой вектор формируется и постоянно видоизменяется в зависимости от состояния всего OLAP-куба данных техноценоза. Цифровой вектор ранга является основной вертикальной структурной единицей OLAP-куба (22).

Цифровой вектор ранга (объекта) по электропотреблению в виде кортежа транзактов k-го ранга техноценоза на t-ом временном интервале:

$$\langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow{k=\text{fix}; t=\text{fix}} \langle \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{PO}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{SM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{DM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{BM}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{DA}} \rangle, \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{KL}} \rangle \rangle; \quad (22)$$

системы кортежей транзактов k-го ранга на t-ом временном интервале:

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{PO}} \rangle \xrightarrow{\text{OPV, VRD, RNG, APR, OVD, PLO}} \langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{RAW}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{VER}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{RAN}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{APP}}] \rangle; \\ \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{SM}} \rangle \xrightarrow{\text{DFA, DZA, ASR, ZPA, OVD, PLO}} \langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{DIF}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{PRO}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{NOR}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{LIM}}] \rangle; \\ \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{DM}} \rangle \xrightarrow{\text{STM, BSP, SSP, DNM, OVD, POT}} \langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{IPK}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{IPZ}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{IPE}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{DFU}}] \rangle; \\ \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{BM}} \rangle \xrightarrow{\text{BFM, ZPA, OVD, STM, AGR, DSP, PLO, BSP}} \langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{AMC}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{AMD}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{BIF}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{DAM}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{MOD}}] \rangle; \\ \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{DA}} \rangle \xrightarrow{\text{OVD, DOD, OVR, VRD, DSP, DFA, DZA, KON}} \langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{VRO}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{VRR}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{VOT}}] \rangle; \\ \langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{KL}} \rangle \xrightarrow{\text{OPV, OVD, VRD, DSP, RNG, APR, SSP, DNM}} \langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{PLN}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{PLO}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{POT}}] \rangle, \end{array} \right.$$

где  $\langle \mathbf{W}_{kt}^{\text{OLAP}} \rangle$  – кортеж транзакта k-го ранга на t-ом временном интервале;  $\langle \mathbf{W}_{kt}^s \rangle$  – кортеж s-ой группы слоев k-го ранга на t-ом временном интервале;  $\langle [\mathbf{W}_{kt}^{\text{p1}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{p2}}], [\mathbf{W}_{kt}^{\text{p3}}] \rangle$  – кортеж группы слоев OLAP-куба данных техноценоза по электропотреблению k-го ранга на t-ом временном интервале;  $\xrightarrow{\text{OPV, OVD, VRD, ...}}$  – элементы программного функционала, участвующие в преобразовании.

Цифровой срез техноценоза – плоская структура данных (как правило, двумерный массив), хранящая идентифицируемый по индексу и/или рангу (первое измерение), а также идентификатору слоя данных (второе измерение), набор параметров, являющихся результатом цикличной реализации программного функционала на OLAP-кубе данных (23). Цифровой срез техноценоза дает полное параметрическое описание всех рангов (объектов) техноценоза в фиксированный момент времени. Также как и с цифровым вектором, здесь следует иметь в виду, что, не смотря на то, что цифровой срез отражает состояние техноценоза в определенный момент времени, он формируется и постоянно видоизменяется в зависимости от состояния OLAP-куба на протяжении всего периода моделирования.

Цифровой срез данных техноценоза по параметру электропотребления:

$$\langle W_{kp}^{OLAP} \rangle \xrightarrow[t=T]{k=1..n} \left\langle \begin{matrix} [RAW]_{kT} & [DIF]_{kT} & [IPK]_{kT} & [AMC]_{kT} & [DAM]_{kT} \\ [VER]_{kT} & [PRO]_{kT} & [IPZ]_{kT} & [AMD]_{kT} & [VRO]_{kT} \\ [RAN]_{kT} & [NOR]_{kT} & [IPE]_{kT} & [BIF]_{kT} & [VRR]_{kT} \\ [APP]_{kT} & [LIM]_{kT} & [DFU]_{kT} & [MOD]_{kT} & [VOT]_{kT} \end{matrix} \right\rangle; \quad (23)$$

двумерный массив цифрового среза данных по электропотреблению:

$$\left[ W_{kt}^p \right] \xrightarrow[p=1..m]{k=1..n, t=T} \left[ \begin{matrix} W_{1T}^1 & W_{1T}^2 & W_{1T}^3 & \dots & W_{1T}^j & \dots & W_{1T}^{m-1} & W_{1T}^m \\ W_{2T}^1 & W_{2T}^2 & W_{2T}^3 & \dots & W_{2T}^j & \dots & W_{2T}^{m-1} & W_{2T}^m \\ W_{3T}^1 & W_{3T}^2 & W_{3T}^3 & \dots & W_{3T}^j & \dots & W_{3T}^{m-1} & W_{3T}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{iT}^1 & W_{iT}^2 & W_{iT}^3 & \dots & W_{iT}^j & \dots & W_{iT}^{m-1} & W_{iT}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{nT}^1 & W_{nT}^2 & W_{nT}^3 & \dots & W_{nT}^j & \dots & W_{nT}^{m-1} & W_{nT}^m \end{matrix} \right],$$

где  $\langle W_{kp}^{OLAP} \rangle$  – OLAP-куб данных техноценоза по электропотреблению в момент времени  $t = T$ ;  $\left[ W_{kt}^p \right]$  – матрица цифрового среза OLAP-куба данных техноценоза по электропотреблению в момент времени  $t = T$ ;  $W_{kT}^p$  – значение параметра, соответствующее  $k$ -му рангу в момент времени  $t = T$  в  $p$ -ом слое данных куба;  $k$  – ранг техноценоза;  $p$  – идентификатор рассматриваемого слоя OLAP-куба.



Цифровой двойник ранга техноценоза – плоская структура данных (как правило, двумерный массив), хранящая идентифицируемый по идентификатору слоя данных (первое измерение), а также номеру временного интервала (второе измерение), набор параметров, являющихся результатом циклической реализации программного функционала на OLAP-кубе данных по электропотреблению применительно к выделенному рангу (24). Цифровой двойник ранга техноценоза дает полное параметрическое описание выделенного ранга техноценоза на всем промежутке времени.

Цифровой двойник ранга техноценоза по параметру электропотребления:

$$\langle W_{kt}^{OLAP} \rangle \xrightarrow[t=1..\tau]{k=R} \left\langle \begin{matrix} [RAW]_{Rt} & [DIF]_{Rt} & [IPK]_{Rt} & [AMC]_{Rt} & [DAM]_{Rt} \\ [VER]_{Rt} & [PRO]_{Rt} & [IPZ]_{Rt} & [AMD]_{Rt} & [VRO]_{Rt} \\ [RAN]_{Rt} & [NOR]_{Rt} & [IPE]_{Rt} & [BIF]_{Rt} & [VRR]_{Rt} \\ [APP]_{Rt} & [LIM]_{Rt} & [DFU]_{Rt} & [MOD]_{Rt} & [VOT]_{Rt} \end{matrix} \right\rangle; \quad (24)$$

двумерный массив цифрового двойника ранга по электропотреблению:

$$\left[ W_{kt}^p \right] \xrightarrow[p=1..m]{k=R, t=1..\tau} \begin{bmatrix} W_{R1}^1 & W_{R1}^2 & W_{R1}^3 & \dots & W_{R1}^j & \dots & W_{R1}^{m-1} & W_{R1}^m \\ W_{R2}^1 & W_{R2}^2 & W_{R2}^3 & \dots & W_{R2}^j & \dots & W_{R2}^{m-1} & W_{R2}^m \\ W_{R3}^1 & W_{R3}^2 & W_{R3}^3 & \dots & W_{R3}^j & \dots & W_{R3}^{m-1} & W_{R3}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{Ri}^1 & W_{Ri}^2 & W_{Ri}^3 & \dots & W_{Ri}^j & \dots & W_{Ri}^{m-1} & W_{Ri}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{R\tau}^1 & W_{R\tau}^2 & W_{R\tau}^3 & \dots & W_{R\tau}^j & \dots & W_{R\tau}^{m-1} & W_{R\tau}^m \end{bmatrix},$$

где  $\langle W_{kt}^{OLAP} \rangle$  – OLAP-куб данных техноценоза по электропотреблению для значения ранга  $k = R$ ;  $\left[ W_{kt}^p \right]$  – матрица цифрового двойника ранга  $k = R$  OLAP-куба данных техноценоза по электропотреблению;  $W_{Rt}^p$  – значение соответствующего  $p$ -му слою данных параметра для ранга  $k = R$  в  $t$ -ый момент времени;  $k$  – ранг;  $t$  – интервал времени ( $\tau$  – общее количество интервалов);  $p$  – идентификатор слоя данных OLAP-куба ( $m$  – общее количество слоев данных).

Цифровой двойник объекта техноценоза – плоская структура данных (как правило, двумерный массив), хранящая идентифицируемый по идентификатору слоя данных (первое измерение), а также номеру временного

интервала (второе измерение), набор параметров, являющихся результатом циклической реализации программного функционала на OLAP-кубе данных по электропотреблению применительно к выделенному объекту (25). Цифровой двойник объекта техноценоза дает полное параметрическое описание выделенного объекта техноценоза на всем промежутке времени.

Цифровой двойник объекта техноценоза по электропотреблению:

$$\langle W_{qt}^{OLAP} \rangle \xrightarrow[t=1..\tau]{q=B} \left\langle \begin{matrix} [RAW]_{Bt} & [DIF]_{Bt} & [IPK]_{Bt} & [AMC]_{Bt} & [DAM]_{Bt} \\ [VER]_{Bt} & [PRO]_{Bt} & [IPZ]_{Bt} & [AMD]_{Bt} & [VRO]_{Bt} \\ [RAN]_{Bt} & [NOR]_{Bt} & [IPE]_{Bt} & [BIF]_{Bt} & [VRR]_{Bt} \\ [APP]_{Bt} & [LIM]_{Bt} & [DFU]_{Bt} & [MOD]_{Bt} & [VOT]_{Bt} \end{matrix} \right\rangle; \quad (25)$$

двумерный массив цифрового двойника объекта по электропотреблению:

$$\left[ W_{qt}^p \right] \xrightarrow[p=1..m]{q=B, t=1..\tau} \begin{bmatrix} W_{B1}^1 & W_{B1}^2 & W_{B1}^3 & \dots & W_{B1}^j & \dots & W_{B1}^{m-1} & W_{B1}^m \\ W_{B2}^1 & W_{B2}^2 & W_{B2}^3 & \dots & W_{B2}^j & \dots & W_{B2}^{m-1} & W_{B2}^m \\ W_{B3}^1 & W_{B3}^2 & W_{B3}^3 & \dots & W_{B3}^j & \dots & W_{B3}^{m-1} & W_{B3}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{Bi}^1 & W_{Bi}^2 & W_{Bi}^3 & \dots & W_{Bi}^j & \dots & W_{Bi}^{m-1} & W_{Bi}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{B\tau}^1 & W_{B\tau}^2 & W_{B\tau}^3 & \dots & W_{B\tau}^j & \dots & W_{B\tau}^{m-1} & W_{B\tau}^m \end{bmatrix},$$

где  $\langle W_{qt}^{OLAP} \rangle$  – OLAP-куб данных техноценоза по электропотреблению для объекта, имеющего индекс  $q = B$ ;  $\left[ W_{qt}^p \right]$  – матрица цифрового двойника объекта техноценоза, имеющего индекс  $q = B$ ;  $W_{Bt}^p$  – значение соответствующего  $p$ -му слою данных параметра для объекта с индексом  $q = B$  в  $t$ -ый момент времени;  $q$  – индекс объекта техноценоза ( $n$  – общее количество объектов);  $t$  – интервал времени ( $\tau$  – общее количество интервалов);  $p$  – идентификатор слоя данных OLAP-куба ( $m$  – общее количество слоев данных техноценоза).

#### 4. Концепция цифровой платформы [на содержание]

Итак, параметрическая виртуализация, предполагающая формирование и обработку хранилища данных с использованием процедур рангового анализа техноценоза по электропотреблению, позволяет создать его одно-

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

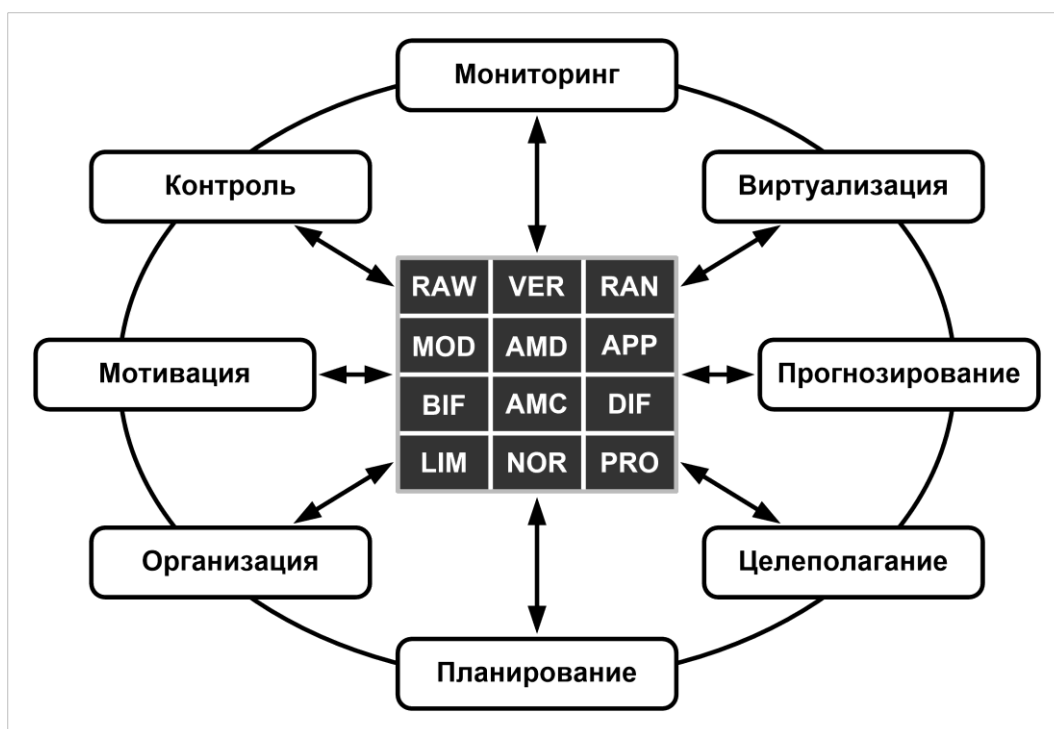


Рис. 8. Параметрический цифровой двойник в управлении

Вспомним, что электропотребление – целеустремленный управляемый процесс, осуществляемый с целью обеспечения электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества с предельно возможной экономией электроэнергии и минимизацией затрат. Если взглянуть на цикл управления (рис. 8), то можно заключить, что применение параметрического цифрового двойника в управлении позволит существенно повысить качество на всех этапах и, тем самым, создаст предпосылки для разработки новой цифровой платформы энергоэффективности (см. [10]).

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

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

Вектор верификации

Вектор моделирования

Матрица предыдущих данных

Рис. 9. Информационные подсистемы параметрической адаптации данных по электропотреблению

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

Процессная модель параметрической адаптации данных реализуется следующим образом. После загрузки данных осуществляется выбор очередного слоя, который делится на три информационных подсистемы: матрицы данных, вектора верификации (последнего известного вектора данных), а также вектора моделирования (рис. 9). На основе матрицы данных осуществляется прогнозирование на вектор верификации, а полученный

прогноз сравнивается по критерию точности с самим вектором верификации рассматриваемого слоя. В качестве показателей точности рассматриваются абсолютные и относительные (средние и полные) ошибки, рассчитываемые по методике, изложенной в (см. [здесь](#)). Там же изложены и рекомендации по принятию решения относительно спорных случаев (когда отдельные показатели точности дают результаты «вразнобой», а общий вывод становится неочевидным). После того как циклично будут рассчитаны показатели точности для каждого из четырех первичных слоев, производится выбор слоя данных, на котором наблюдается наивысшая точность прогнозирования. Он и рассматривается на данном временном интервале в качестве опорного, который будет в дальнейшем использоваться в качестве исходного для реализации процедур рангового анализа с целью получения вторичных слоев данных по электропотреблению.

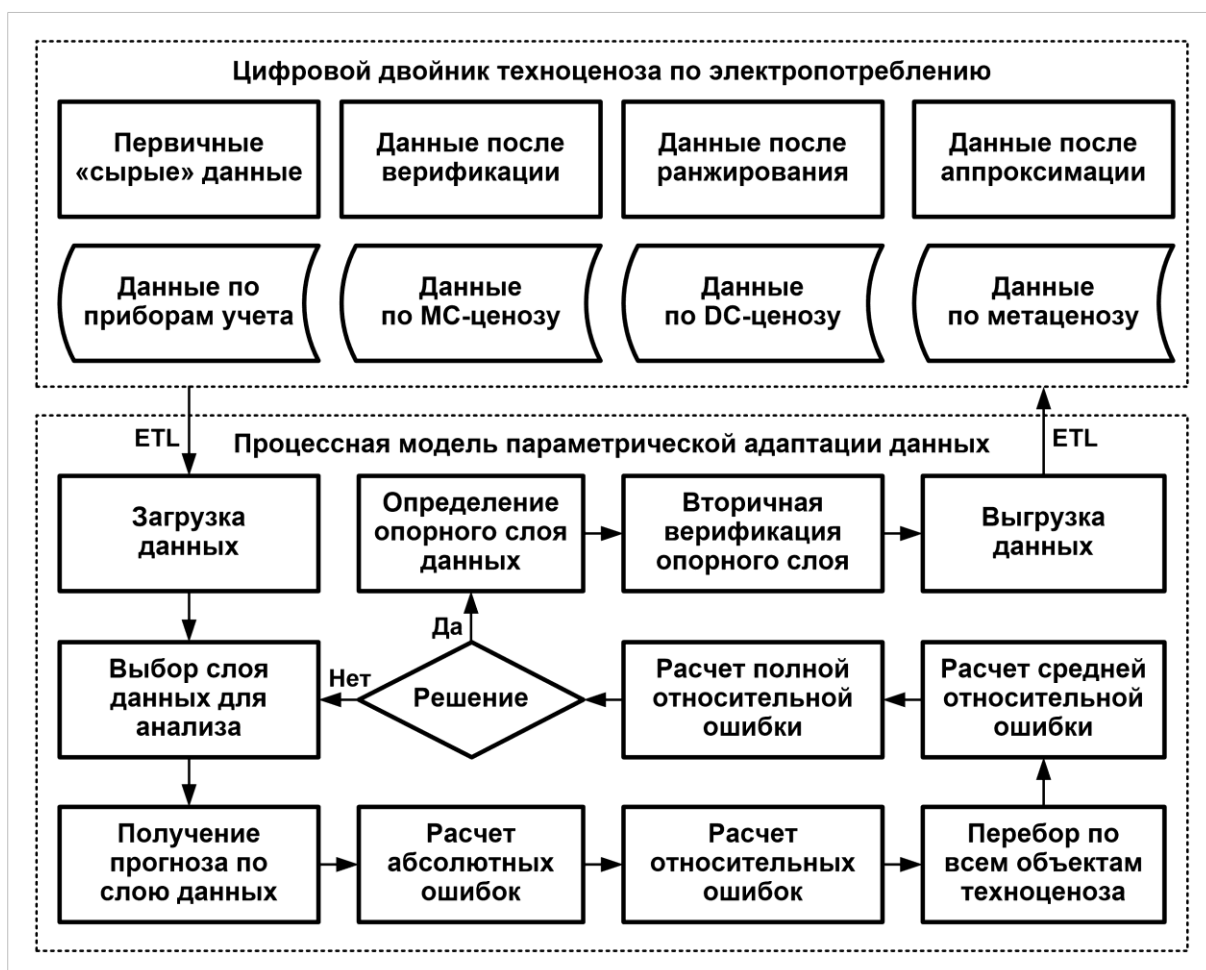


Рис. 10. Концептуальная модель параметрической адаптации данных

Итак, цифровая платформа энергоэффективности реализует применение параметрического цифрового двойника в управлении, что позволяет повысить качество на всех этапах процесса электропотребления (рис. 11).

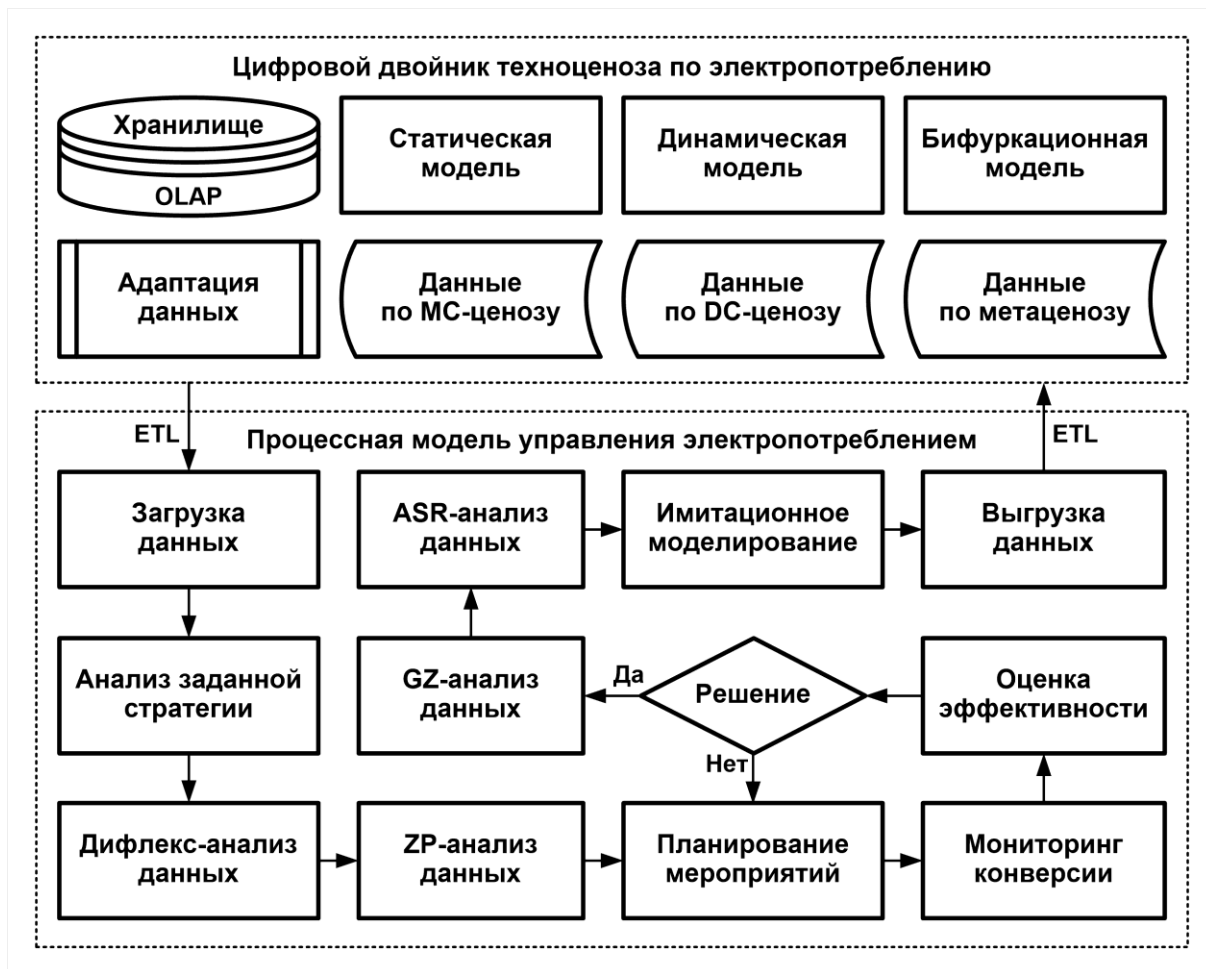


Рис. 11. Концептуальная модель цифровой платформы

Процессная модель управления электропотреблением в рамках цифровой платформы реализуется следующим образом. После загрузки данных осуществляется анализ стратегии энергосбережения. Затем применительно к опорному слою данных производятся процедуры интервального оценивания, дифлекс-анализа, потенцирования и ZP-анализа (рис. 12). Далее осуществляется процедура ZP-планирования, которая завершается мониторингом конверсии и расчетом показателей эффективности. После этого, на основе информации о соответствии показателей эффективности стратегическим требованиям, принимается решение. Если показатели не удовлетворяют требованиям, то осуществляется возврат к этапу планирования мероприятий, изменяются показатели ZP-плана и цикл повторяется. В случае если будет отмечено соответствие показателей эффективности, производится переход к процедурам прогнозирования (GZ-анализа) и нормирования (ASR-анализа). Завершаются расчеты моделированием с учетом информации о MS- и DC-ценозах, а также бифуркационных процессах.

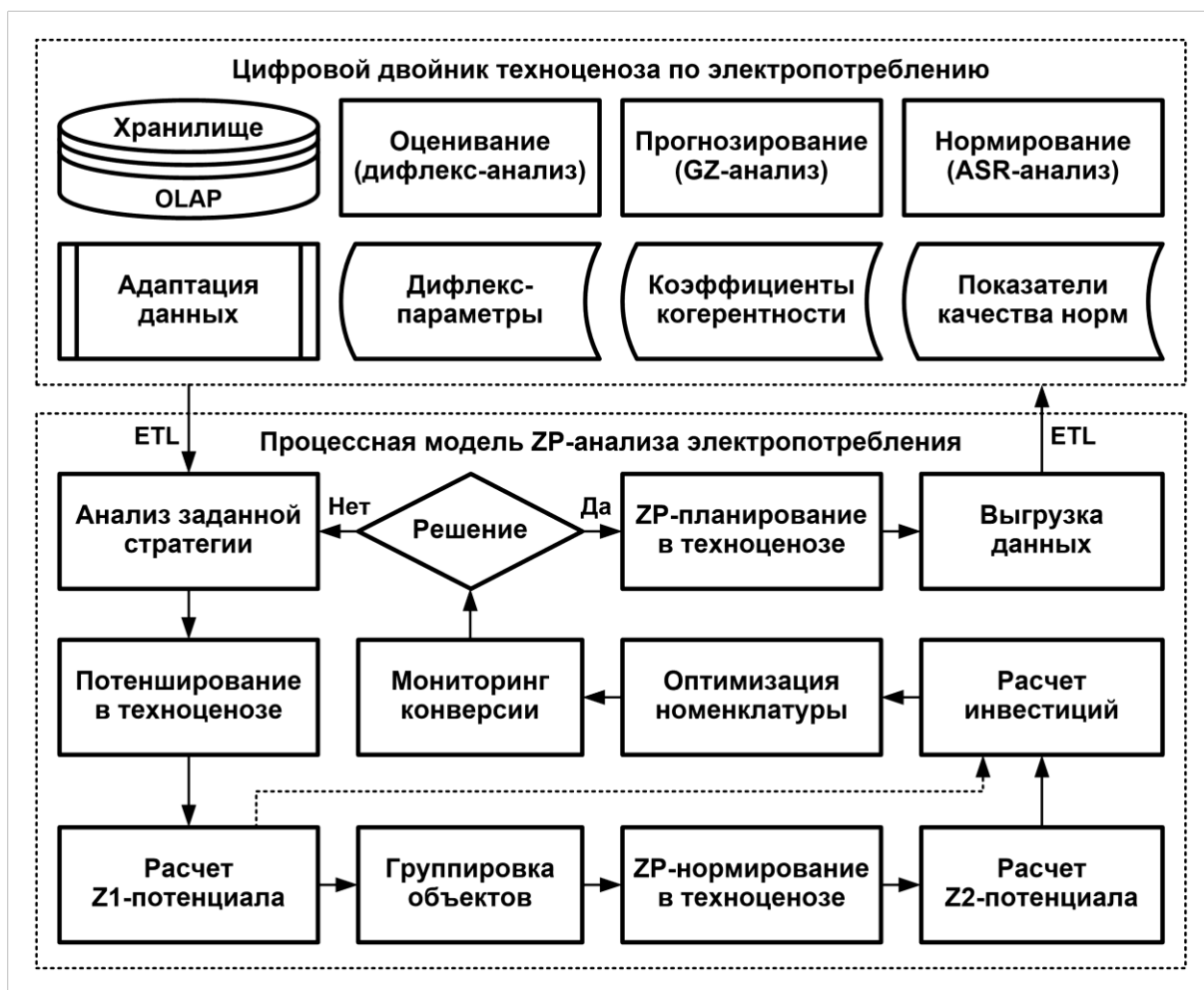


Рис. 12. Концептуальная модель подсистемы ZP-анализа

Центральное место в процессной модели управления электропотреблением занимает подсистема ZP-анализа (рис. 12). Рассмотрим ее подробнее. Процессная модель ZP-анализа в рамках управления электропотреблением реализуется следующим образом. После загрузки данных и анализа заданной стратегии энергосбережения осуществляется потенширование, которое завершается расчетом Z1-потенциала энергосбережения. Далее производится группировка объектов по функциональным группам, ZP-нормирование и расчет Z2-потенциала энергосбережения. Затем рассчитываются инвестиции, производится оптимизация номенклатуры приемников электроэнергии и мониторинг конверсии. Оценивается степень соответствия уровня электропотребления плановым показателям. При достаточном соответствии осуществляется ZP-планирование в техноценозе и производится выгрузка данных. В противном случае осуществляется возврат к этапу анализа стратегии и расчеты циклично повторяются.

На рисунке 13 представлена реляционная модель цифровой платформы. Это логическая схема, отражающая ключевые отношения, связи между ними, целостность, а также процессы преобразования данных. Ос-

новное внимание здесь уделено функциональным связям между слоями данных, агрегаторами и процессами преобразования. Связи между слоями обеспечиваются программным функционалом техноценоза, под которым понимается кортеж преобразователей и агрегаторов, предназначенных для реализации статической, динамической и бифуркационной моделей, а также процедуры обратной адаптации на OLAP-кубе данных техноценоза.

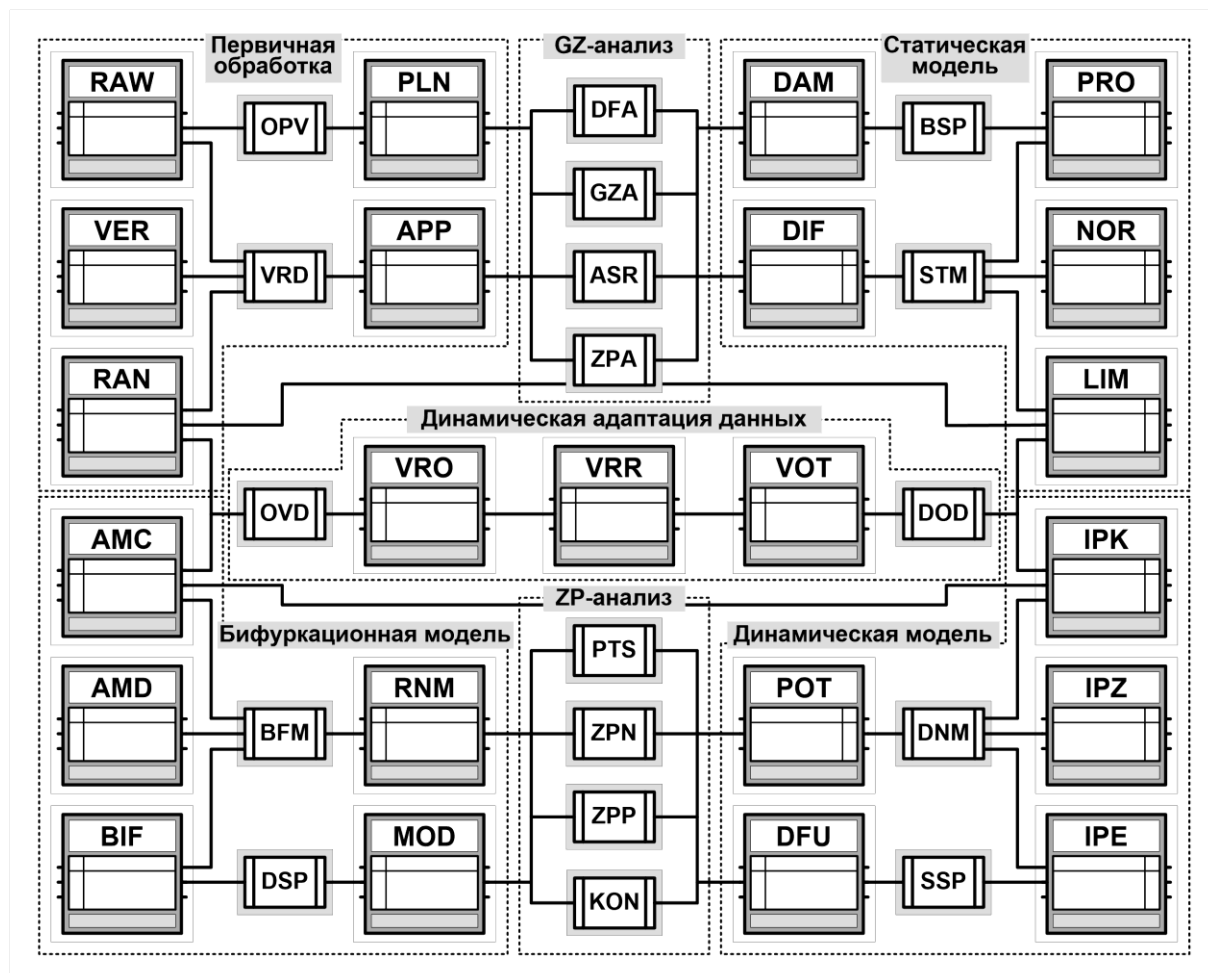


Рис. 13. Реляционная модель цифровой платформы

Реляционная модель цифровой платформы обеспечивает пять потоков данных: очистки и абстрагирования, инерционной, динамической и бифуркационной обработки, а также обратной адаптации. Поток очистки и абстрагирования реализуется в основном в рамках модуля первичной обработки и включает в себя первичные слои «сырых», верифицированных, отранжированных, а также аппроксимированных данных (RAW, VER, RAN, APP). Здесь же находится классификатор используемых приемников электроэнергии (PLN) и два преобразователя: организатор (OPV) и верификатор (VRD). Поток очистки и агрегирования данных сообщается с потоком инерционной обработки данных посредством модуля GZ-анализа,



включающего в себя четыре преобразователя: DF-анализатор (DFA), GZ-анализатор (GZA), ASR-анализатор (ASR) и ZP-анализатор (ZPA).

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

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

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

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

Следует заметить, что перечисленные преобразователи составляют основу программного функционала техноценоза, под которым понимается кортеж преобразователей и агрегаторов, предназначенных для реализации статической, динамической и бифуркационной моделей, а также процедуры обратной адаптации на OLAP-кубе данных техноценоза по электропотреблению (функционал упоминался выше: см. выражения (19) – (25)).

Мы рассмотрели концепцию цифровой платформы энергоэффективности, которая предусматривает применение параметрического цифрового двойника в управлении техноценозом, что позволяет повысить качество на всех этапах управления. Однако предлагаемая здесь платформа отнюдь не решает все вопросы цифровизации процесса «электроснабжение – электропотребление», если ее рассматривать как переход техноценоза на новые

модели бизнес-процессов, менеджмента и способов производства, основанных на современных информационных технологиях. Наглядно место нашей цифровой платформы энергоэффективности можно показать, если рассмотреть общую схему паттерна VSM Cenose (рис. 14).

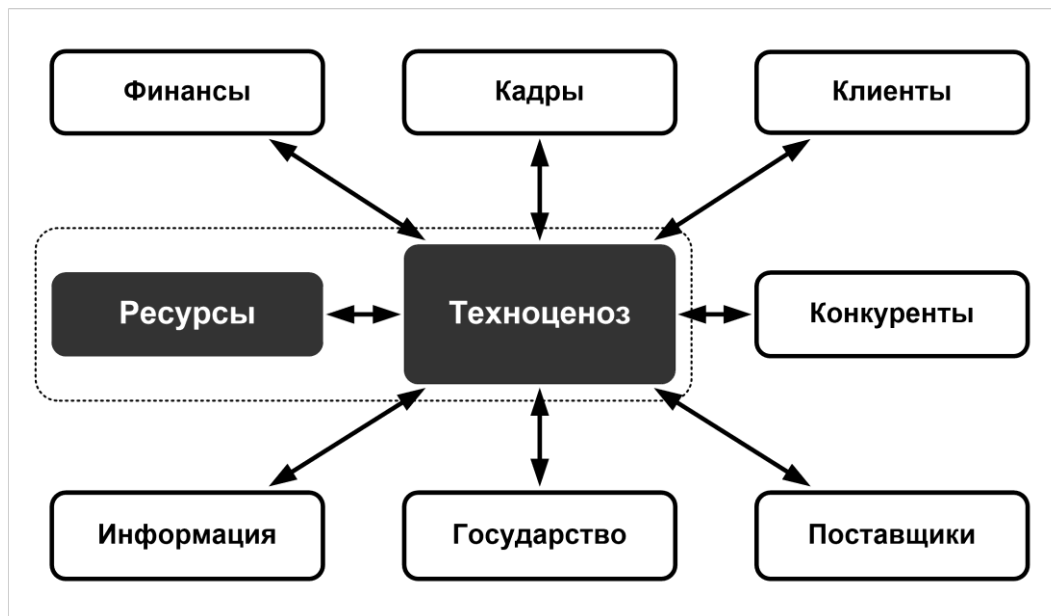


Рис. 14. Параметрический цифровой двойник в паттерне VSM Cenose

Как известно, паттерн VSM Cenose – шаблон самовоспроизводящейся организации ценологического типа с VSM-подобной системой управления, который единообразно моделирует инвариантные, ресурсные и структурные свойства организации (техноценоза) [3]. Таким образом, параметрический цифровой двойник по электропотреблению рассматривается как ресурсная подсистема паттерна VSM Cenose, отражающая взаимодействие техноценоза с региональным электроэнергетическим комплексом лишь по отдельному параметру – дифференциальному электропотреблению.

## 5. Гиперпараметрическое развертывание [на содержание]

Следует отметить, что в процессе параметрической виртуализации техноценоза по электропотреблению, предполагающей формирование и обработку хранилища данных с использованием процедур рангового анализа, зачастую требуется осуществлять, так называемое, гиперпараметрическое развертывание слоев OLAP-куба данных. При этом каждый плоский двумерный слой данных развертывается в трехмерный объект – куб данных. В качестве примера рассмотрим развертывание слоя, содержащего дифлекс-параметры техноценоза (дифлекс-слоя), в дифлекс-куб (рис. 15).

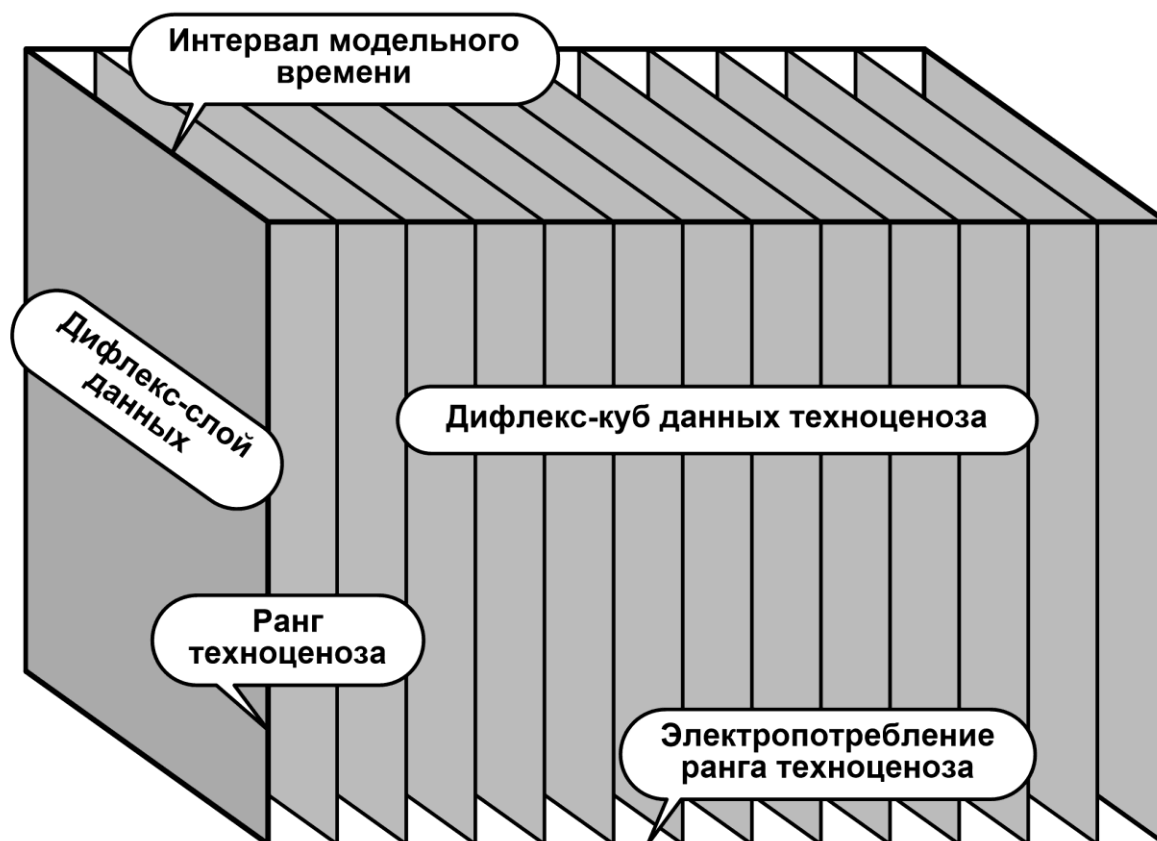


Рис. 15. Структура дифлекс-куба данных по электропотреблению

В процессе гиперпараметрического развертывания выполняется следующее. Изначально в пределах плоскости слоя дифлекс-параметров [DIF] для каждого момента модельного времени каждому значению топологического ранга ставится в соответствие значение дифлекс-параметра, вычисленного в процедуре дифлекс-анализа. Кроме того, если рассмотреть слой отранжированных данных [RAN], то можно увидеть, что в нем каждому значению топологического ранга ставится в соответствие еще и значение дифференциального электропотребления, зафиксированного в определенный момент времени функционирования техноценоза. Мы видим, что имеется возможность поставить в однозначное соответствие три параметра: топологический ранг, дифференциальное электропотребление и дифлекс-параметр. При этом важно связывать данные с учетом точного соответствия как моменту модельного времени, так и значению топологического ранга. Из рисунка 15 видно, что в процессе развертывания дифлекс-слоя мы получаем трехмерный объект, который и является дифлекс-кубом. Необходимость в подобной операции возникает, в частности, при цифровой подготовке данных для построения ранговых гиперпараметрических поверхности и распределения (рис. 16, подробнее – [см. здесь](#)).

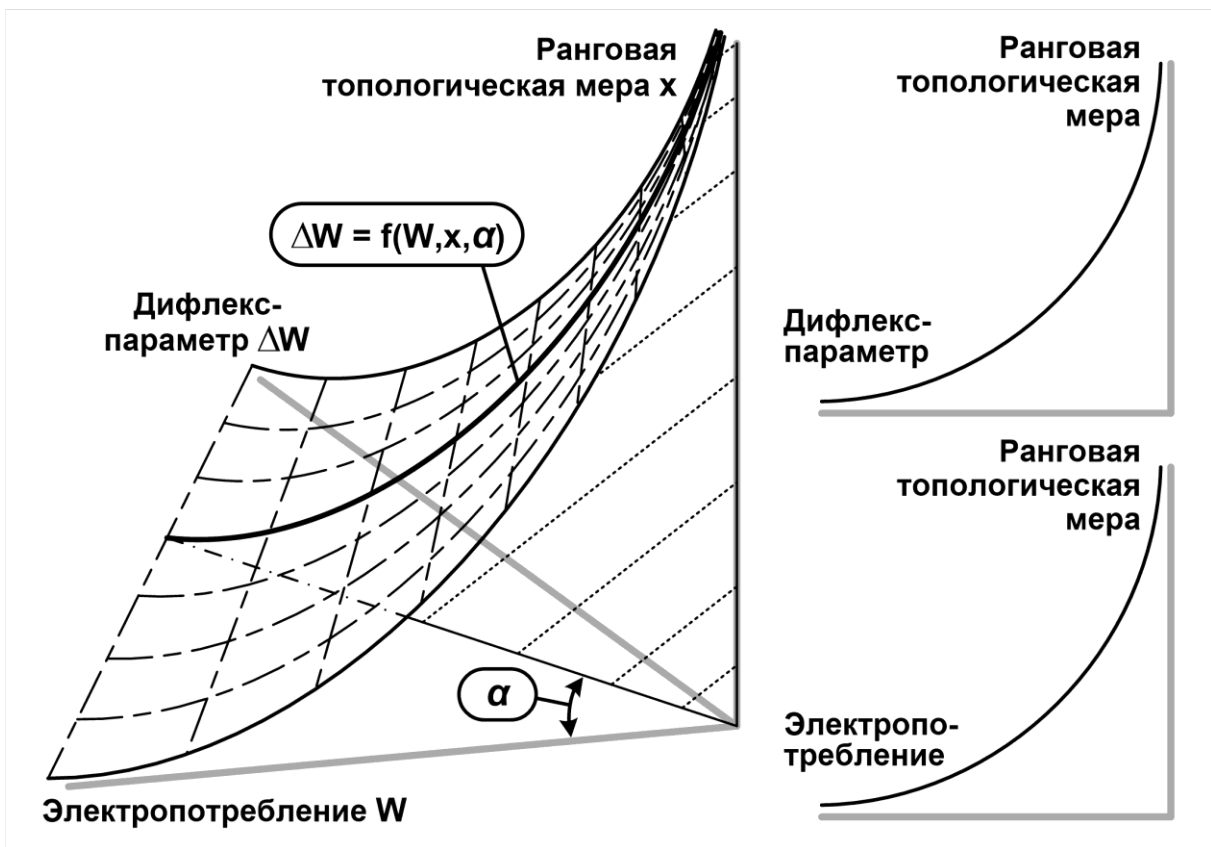
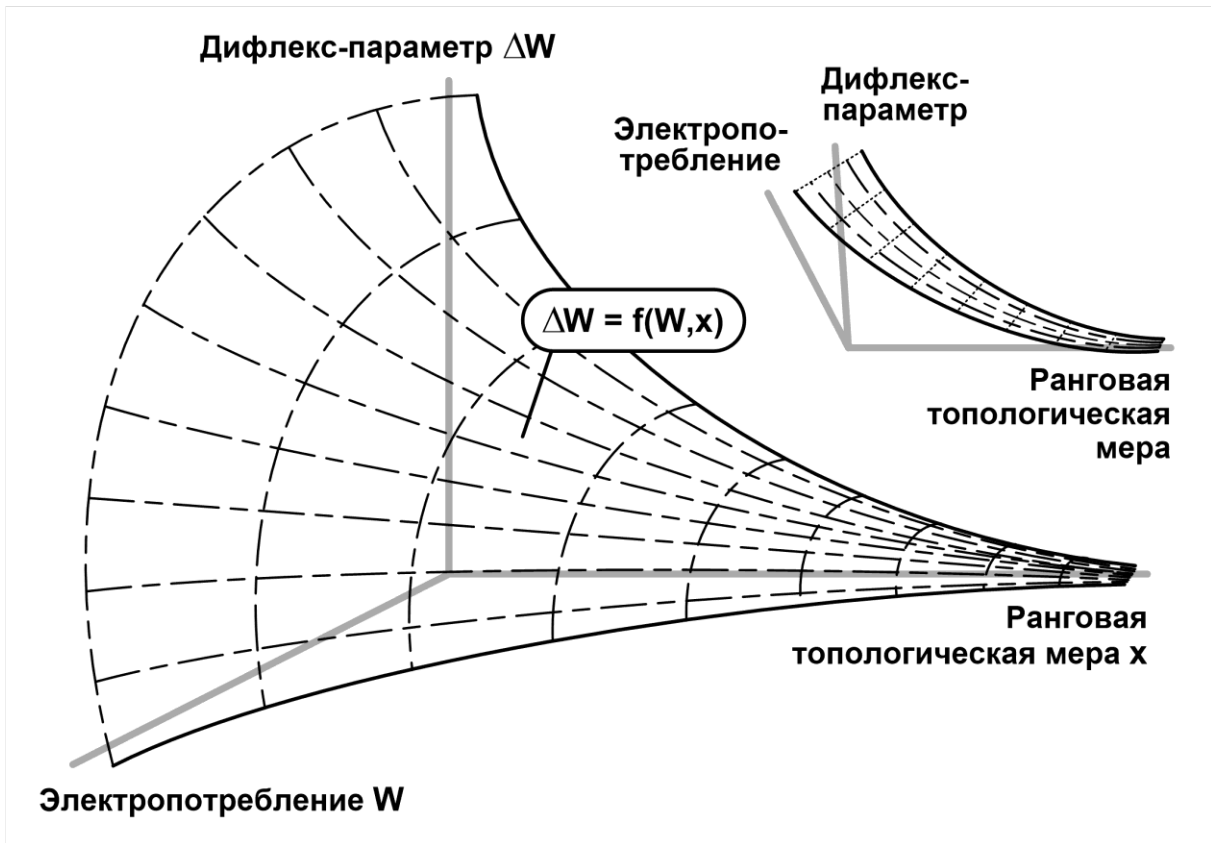


Рис. 16. Ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение

На рисунке 16 показаны два графических фрагмента: верхний – это ранговая гиперпараметрическая поверхность; нижний – ранговое гиперпараметрическое распределение. Оба распределения построены для фиксированного момента времени. Здесь используются следующие обозначения:  $\Delta W(W, x)$  – скалярная функция, определенная на ранговой гиперпараметрической поверхности техноценоза по электропотреблению;  $\Delta W$  – дифлекс-параметр;  $W$  – электропотребление;  $x$  – ранговая топологическая мера (непрерывный аналог ранга [11]);  $\Delta W(W, x, \alpha)$  – скалярная функция, определенная на ранговом гиперпараметрическом распределении;  $\alpha$  – дифлекс-угол техноценоза. В нашей работе [11] описана методика применения ранговых гиперпараметрических распределений в процессе управления электропотреблением. В частности, там вводятся комплексный критерий оценки процесса электропотребления техноценоза, а также понятие дамадж-параметра, как количественной меры ущерба, наносимого техноценозу за счет неэффективного электропотребления (рис. 17).

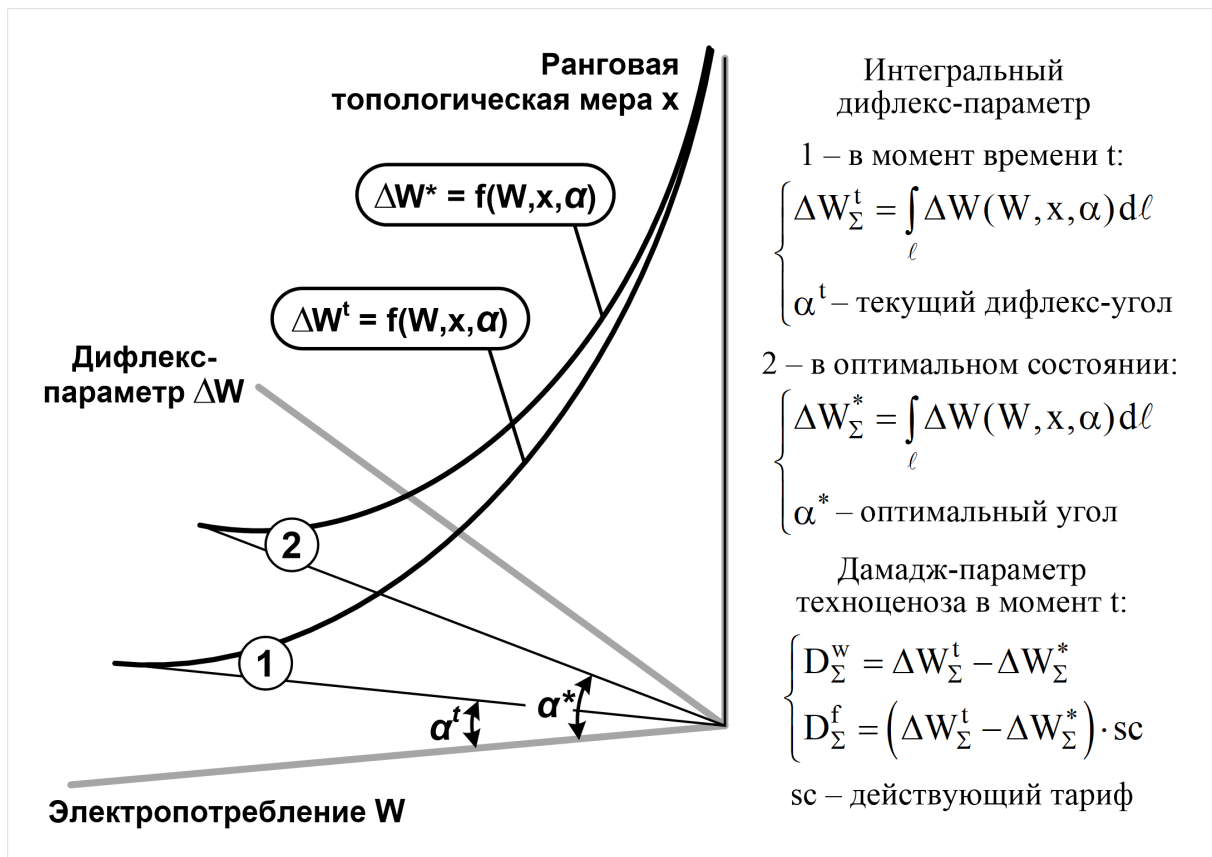


Рис. 17. К понятию дамадж-параметра техноценоза

В качестве перспективного направления развития методов управления рассматривается переход к динамической оценке, что требует введения динамических дифлекс-функционалов техноценоза ( $t$  – время):

$$\begin{cases} \Delta W(t) = F^w(W(t), x(t)); \\ \alpha(t) = F^\alpha(W(t), x(t)). \end{cases} \quad (26)$$

Система (26) наглядно демонстрирует необходимость параметрического развертывания дифлекс-слоя данных (взятого из OLAP-куба) в дифлекс-куб. Только таким способом можно подготовить все необходимые данные для полноценной реализации цифровой платформы энергоэффективности в процессе управления электропотреблением техноценоза.

Здесь следует вспомнить, что мы рассмотрели гиперпараметрическое развертывание только одного слоя данных (в данном случае – дифлекс-параметров [DIF]). Очевидно, что в процессе управления электропотреблением техноценоза на различных этапах может возникнуть потребность аналогичного развертывания других слоев данных, например: [PRO] – результатов инерционного прогнозирования; [NOR] – норм электропотребления; [LIM] – лимитов электропотребления; [AMC] – добавочных ресурсов МС-ценоза; [AMD] – добавочных ресурсов DC-ценоза; [BIF] – добавочных ресурсов бифуркации; [MOD] – модельных данных. Как правило, подобное развертывание осуществляется с использованием в качестве третьего измерения универсального слоя отранжированных данных по электропотреблению ([RAN]). Однако могут использоваться и другие слои.

Полученные в процессе параметрического развертывания кубы данных называются гиперпараметрами. Под гиперпараметром математически понимается ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза – заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция двух переменных, ставящая в однозначное соответствие множеству значений одного параметра множество значений другого параметра и ранговой топологической меры. В качестве аргументов гиперпараметра используются данные тех или иных слоев OLAP-куба (в соответствии с задачами).

Преобразование исходного OLAP-куба (рис. 7), при котором отдельные его двумерные слои развертываются в трехмерные кубы данных, позволяет получить четырехмерный объект, который предлагается называть тессерактом техноценоза по электропотреблению (рис. 18).

Дадим общее определение. Итак, тессеракт данных техноценоза по электропотреблению – это четырехмерный, долговременно хранимый массив данных техноценоза, в котором четвертое измерение формируется за счет темпорально согласованных гиперпараметров. В тессеракте каждый гиперпараметр представляется в виде развернутого куба данных. Темпоральное согласование данных позволяет избежать многомерности модельного времени, а также транзакционного рассогласования программного функционала платформы энергоэффективности (рис. 19).

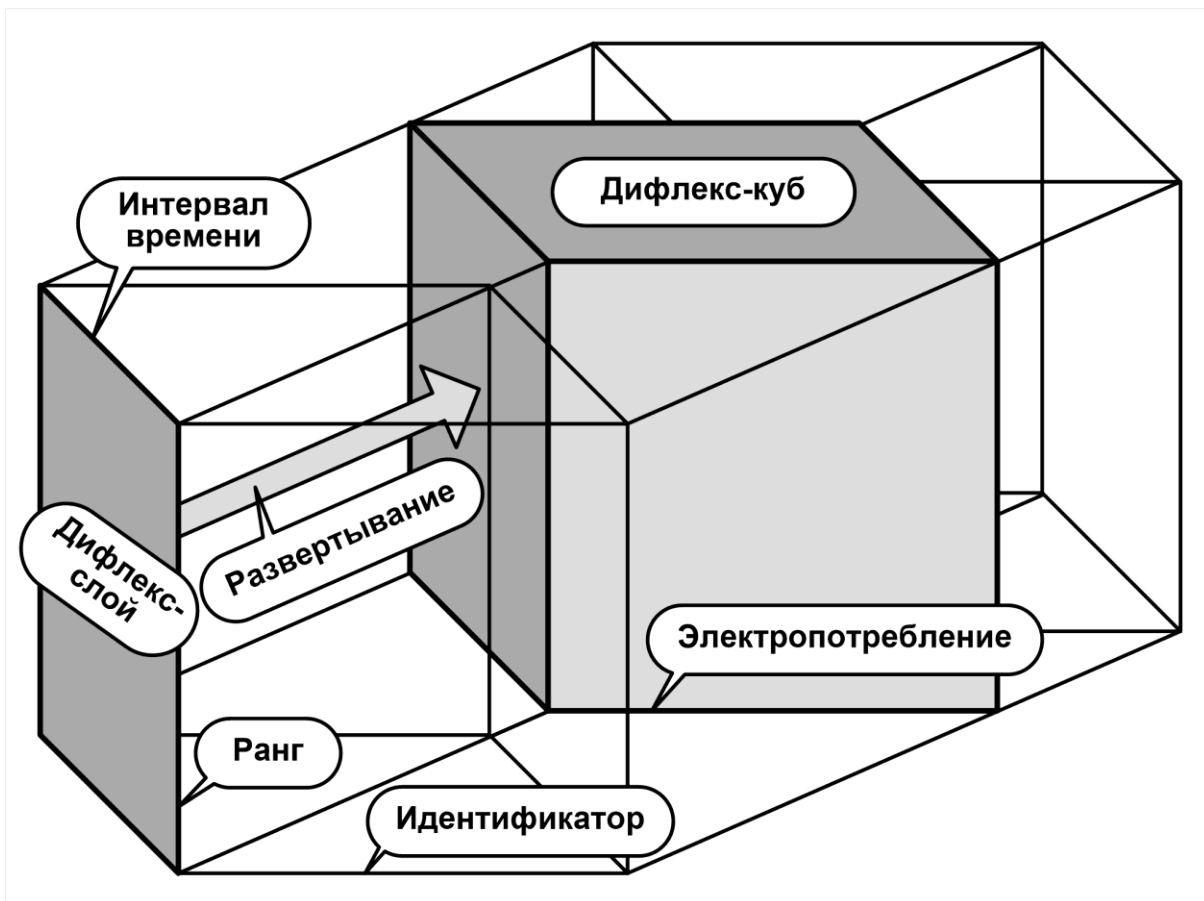


Рис. 18. Тессеракт техноценоза по электропотреблению

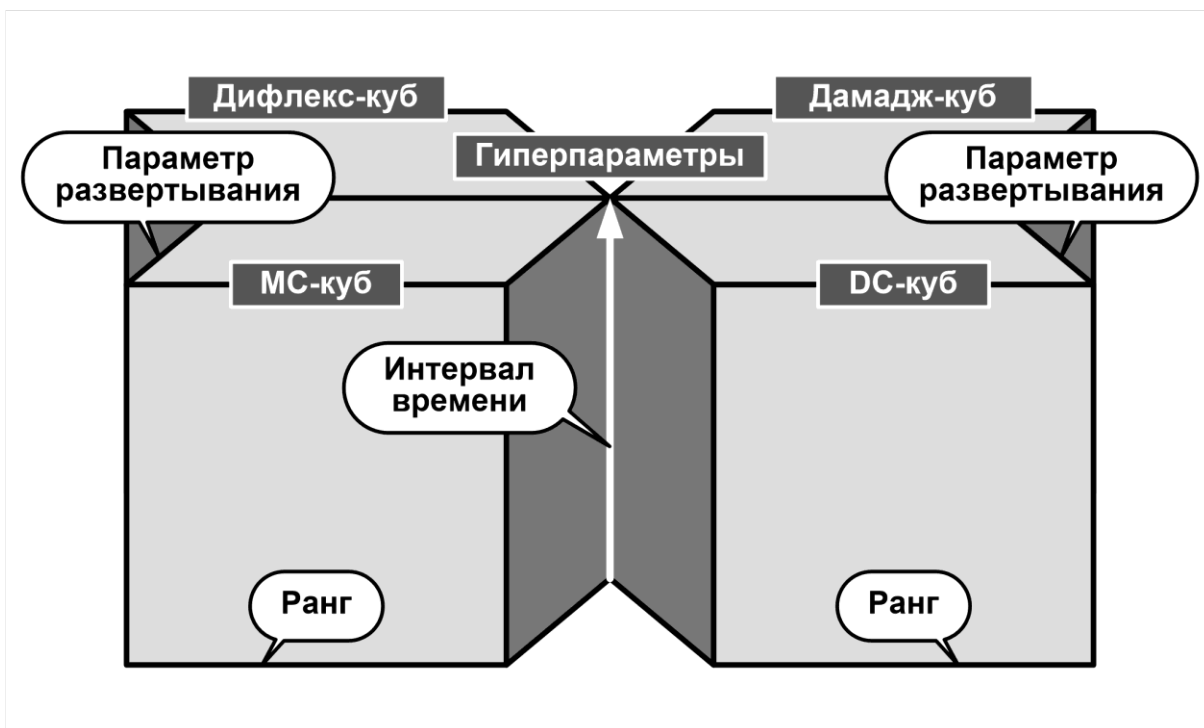


Рис. 19. Темпоральное согласование данных в тессеракте

Математически параметрический тессеракт данных техноценоза по электропотреблению может быть описан следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \langle W_{kt1}^{TSSR} \rangle &\xrightarrow[t=1..\tau]{k=1..n} \left\{ \begin{array}{ccccc} [RAW]_{kt1} & [DIF]_{kt1} & [IPK]_{kt1} & [AMC]_{kt1} & [DAM]_{kt1} \\ [VER]_{kt1} & [PRO]_{kt1} & [IPZ]_{kt1} & [AMD]_{kt1} & [VRO]_{kt1} \\ [RAN]_{kt1} & [NOR]_{kt1} & [IPE]_{kt1} & [BIF]_{kt1} & [VRR]_{kt1} \\ [APP]_{kt1} & [LIM]_{kt1} & [DFU]_{kt1} & [MOD]_{kt1} & [VOT]_{kt1} \end{array} \right\}; \\
 \langle W_{kt2}^{TSSR} \rangle &\xrightarrow[t=1..\tau]{k=1..n} \left\{ \begin{array}{ccccc} [RAW]_{kt2} & [DIF]_{kt2} & [IPK]_{kt2} & [AMC]_{kt2} & [DAM]_{kt2} \\ [VER]_{kt2} & [PRO]_{kt2} & [IPZ]_{kt2} & [AMD]_{kt2} & [VRO]_{kt2} \\ [RAN]_{kt2} & [NOR]_{kt2} & [IPE]_{kt2} & [BIF]_{kt2} & [VRR]_{kt2} \\ [APP]_{kt2} & [LIM]_{kt2} & [DFU]_{kt2} & [MOD]_{kt2} & [VOT]_{kt2} \end{array} \right\}; \\
 \dots\dots\dots \\
 \langle W_{ktg}^{TSSR} \rangle &\xrightarrow[t=1..\tau]{k=1..n} \left\{ \begin{array}{ccccc} [RAW]_{ktg} & [DIF]_{ktg} & [IPK]_{ktg} & [AMC]_{ktg} & [DAM]_{ktg} \\ [VER]_{ktg} & [PRO]_{ktg} & [IPZ]_{ktg} & [AMD]_{ktg} & [VRO]_{ktg} \\ [RAN]_{ktg} & [NOR]_{ktg} & [IPE]_{ktg} & [BIF]_{ktg} & [VRR]_{ktg} \\ [APP]_{ktg} & [LIM]_{ktg} & [DFU]_{ktg} & [MOD]_{ktg} & [VOT]_{ktg} \end{array} \right\},
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

где  $\langle W_{ktg}^{TSSR} \rangle$  – кортеж g-го гиперпараметра данных тессеракта техноценоза по электропотреблению; k – ранг (n – общее количество объектов техноценоза); t – интервал времени (τ – общее количество интервалов модельного времени); g – идентификатор гиперпараметра, в котором осуществляется развертывание данных.

## 6. Интеллектуальное нормирование [на содержание]

Ключевым в процессе управления в рамках цифровой платформы энергоэффективности выступает интеллектуальное нормирование, под которым понимается процедура оптимального управления электропотреблением техноценоза, заключающаяся в определении индивидуальных динамических норм, учитывающих статистические особенности электропотребления объектов в составе техноценоза на обозримом временном этапе.

Целью интеллектуального нормирования является приведение техноценоза в указанный срок с наибольшей вероятностью к целевому состоянию, описываемому ранговым гиперпараметрическим распределением, форма которого минимизирует интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Таким образом, интеллектуальное нормирование



содержит в себе элементы целеполагания, планирования ресурсов и построения стратегии достижения цели. Оно опирается на интеллектуальный анализ данных (Data mining) с целью обнаружения в базах данных по электропотреблению ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных, а также доступных интерпретации и визуализации знаний, необходимых для принятия решений в процессе управления электропотреблением на уровне техноценоза. Ключевой особенностью интеллектуального нормирования является способность извлечения, верификации, аугментации, а также интерпретации и оперирования данными, получаемыми из дисконтинуальных фракталоподобных сред, обладающих негауссовыми свойствами. Неотъемлемой частью интеллектуального нормирования являются проактивное и предиктивное прогнозирование электропотребления, а также машинное обучение в форме обратной адаптации данных. В свою очередь, интеллектуальное нормирование выступает важной частью общего процесса оптимального управления электропотреблением, включающего процедуры верификации данных, дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализа. Интеллектуальное нормирование является ключевым инструментом практической реализации управленческих процедур, реализуемых в рамках рассматриваемой здесь цифровой платформы энергоэффективности.

Интеллектуальное нормирование непосредственно связано с понятием эффективности процесса управления электропотреблением на объектах техноценоза, которая может быть оценена по результатам реализации ZP-анализа (рис. 12) сопоставлением двух интегральных показателей, один из которых характеризует положительный эффект, а второй – затраты. Положительный эффект от внедрения методологии оптимального управления электропотреблением оценивается интегральным показателем вида [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} IP_W^* = \left( \int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^*(r)dr \right) / \int_0^{\infty} W(r)dr ; \\ IP_W^t = \left( \int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^t(r)dr \right) / \int_0^{\infty} W(r)dr , \end{array} \right. \quad (28)$$

- где  $IP_W^*$  – целевой интегральный показатель, определяемый на основе Z1- или Z2-потенциала энергосбережения;  
 $IP_W^t$  – текущий интегральный показатель качества, определяемый на t-ом временном интервале;  
 $W(r)$  – аппроксимационная кривая, полученная для эмпирических значений электропотребления объектов на начальном этапе внедрения методики оптимального управления электропотреблением техноценоза;

- $W^*(r)$  – нижняя граница области допустимых значений, получаемой по итогам ZP-нормирования;
- $W^t(r)$  – аппроксимационная кривая, получаемая для модельных значений электропотребления объектов техноценоза на  $t$ -ом временном интервале.

Как видно, целевой интегральный показатель качества, позволяющий оценить успешность процесса оптимального управления электропотреблением, по сути, представляет собой относительный Z-потенциал энергосбережения техноценоза. При этом на отдельных этапах реализации ZP-плана энергосбережения применяются Z1- и Z2-потенциалы [10].

Результирующий интегральный показатель, отражающий степень близости полученной в результате моделирования текущей аппроксимационной кривой рангового параметрического распределения по электропотреблению к нижней границе области допустимых значений (ограничивающей снизу Z1- или Z2-потенциал), определяется как отношение интегрального показателя качества, рассчитанного для текущего момента времени, к показателю, соответствующему нижней границе [10]:

$$IP_W = \frac{IP_W^t}{IP_W^*} = \frac{\int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^t(r)dr}{\int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^*(r)dr}. \quad (29)$$

Затраты на внедрение методологии оптимального управления электропотреблением также оцениваются интегральным показателем, который отражает степень отличия совокупных затрат на энергосбережение, рассчитанных в результате моделирования на текущем временном интервале, от стоимости электроэнергии, соответствующей Z-потенциалу (Z1 или Z2). В условиях индивидуальных тарифов на электроэнергию, предъявляемых объектам техноценоза на отдельных этапах реализации методологии, данный показатель определяется следующим образом [5,10]:

$$IP_C = 1 + \frac{\int_0^{\infty} C^t(r)dr}{\int_0^{\infty} (W(r) \cdot sc(r))dr - \int_0^{\infty} (W^*(r) \cdot sc^*(r))dr}, \quad (30)$$

- где  $C^t(r)$  – ранговое параметрическое распределение объектов техноценоза по совокупным затратам на процесс энергосбережения на  $t$ -ом временном интервале;
- $sc(r)$  – ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию, предъявляемого объектам на начальном временном интервале, на котором фиксировались эмпирические значения электропотребления и строилось ранговое параметрическое распределение  $W(r)$ ;
- $sc^*(r)$  – ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию, предъявляемого объектам на временном интервале, в котором достигается  $Z$ -потенциал.

Ранговые параметрические распределения по затратам (как правило, измеряемым в денежном выражении), а также по тарифам на электроэнергию строятся для объектов техноценоза аналогично соответствующим ранговым распределениям по электропотреблению. Очевидно, если к объектам техноценоза будут применяться одинаковые тарифы на электроэнергию, то в выражении (30) вместо распределений окажутся константы.

Таким образом, критерием эффективности процесса оптимального управления электропотреблением объектов техноценоза является максимизация интегрального показателя эффективности [10]:

$$IP = \frac{IP_W}{IP_C} \rightarrow \max. \quad (31)$$

Формально показатель  $IP_W$  исчисляется в диапазоне  $[0,1]$ , левая граница которого соответствует полному отсутствию управляющих энергосберегающих процедур (когда кривая  $W^t(r)$  полностью совпадает с исходной кривой  $W(r)$ ), а правая – полному исчерпанию  $Z$ -потенциала (когда кривая  $W^t(r)$  полностью совпадает с конечной кривой  $W^*(r)$ ). В свою очередь, интегральный показатель  $IP_C$  формально исчисляется в диапазоне  $[1,\infty]$ . Левая граница показателя соответствует состоянию с нулевыми затратами на выполнение мероприятий по энергосбережению, правая – бесконечным затратам. Очевидно, что интегральный показатель эффективности  $IP$  находится в пределах  $[0,1]$ , приобретая свое критериальное значение (в принципе недостижимое) при строгом выполнении  $IP = 1$ .

Если взглянуть на ранговую гиперпараметрическую поверхность, изображенную на рисунке 16, то можно заключить следующее (более подробно – см. [10,11]). Как представляется, положение секущей плоскости и, соответственно, угол  $\alpha$  зависят от состояния техноценоза, а также внешних управляющих воздействий в рассматриваемый момент времени. Примечательно, что крайние («вырожденные») состояния техноценоза соот-

ветствуют следующим дифлекс-углам (в градусах):  $\alpha = 0$  – состояние с нулевым дифлекс-параметром во всем диапазоне значений электропотребления;  $\alpha = 90$  – состояние с нулевым электропотреблением во всем диапазоне значений дифлекс-параметров. Состояние с  $\alpha = 0$  соответствует техноценозу, все приемники и потребители которого потребляют электроэнергию на нижней границе области допустимых значений, однако его интегральное электропотребление в этом случае будет максимальным. Это состояние можно считать начальным в общем процессе управления электропотреблением (интегральный показатель  $IP = 0$ ). Состояние с  $\alpha = 90$  соответствует техноценозу, интегральное электропотребление которого равно нулю, что, по сути, означает полное прекращению процесса электропотребления (здесь также  $IP = 0$ ). Очевидно, что реальный техноценоз всегда будет соответствовать какому-то промежуточному значению дифлекс-угла  $\alpha$ , который в процессе оптимального управления электропотреблением должен последовательно увеличиваться до своего целевого значения  $\alpha^*$ . При этом мы получаем состояние, своего рода, минимакса: минимальный интегральный дифлекс-параметр при максимальном значении дифлекс-угла, т.е. минимуме интегрального электропотребления техноценоза ( $IP = 1$ ). Другими словами, в данном случае техноценоз достигает состояния наивысшей энергоэффективности, что, с учетом гарантированного неснижаемого уровня электропотребления на нижней границе области допустимых значений, можно считать конечной целью управления.

Оптимальное управление процессом электропотребления техноценоза может осуществляться исключительно в границах области допустимых значений. Следовательно, оптимум электропотребления будет достигаться при таких значениях параметров управляющего воздействия, направленного на энергосбережение, которые формально обеспечат суммарное электропотребление техноценоза, соответствующее нижней границе области допустимых значений. При этом значение интегрального показателя качества  $IP_w$  станет равным единице. Следовательно, в данном случае смысл оптимизации заключается не в традиционном поиске оптимального значения целевой функции в области варьирования параметров, а в определении оптимальной стратегии изменения параметров, которая минимизирует издержки процесса оптимального управления электропотреблением на пути движения объектов техноценоза к состоянию, обеспечивающему оптимум на нижней границе области допустимых значений (рис. 20) [5,10].

Подобная задача может быть квалифицирована как шаговая задача динамического программирования с закрепленными левым и правым концами траектории (левый закрепленный конец – аппроксимационная кривая электропотребления, правый – нижняя граница области допустимых значений на рисунке 20). Как известно, решается данная задача вариационными методами с использованием принципа оптимальности Беллмана.

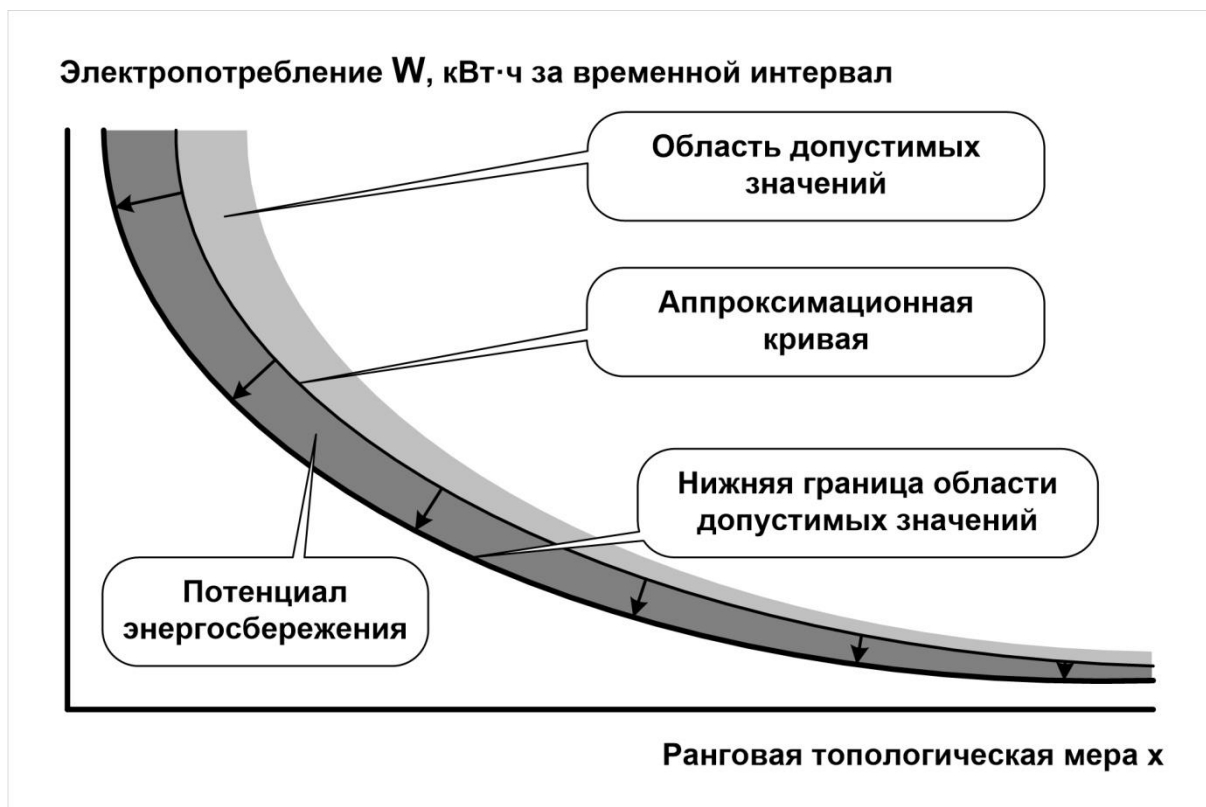


Рис. 20. К понятию оптимума электропотребления техноценоза (стрелками показано направление оптимизации)

Постановка задачи (подробнее – см. [10]): исследуемая система (техноценоз) описывается дискретным множеством переменных состояния

$$w \equiv (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n, \dots), \quad (32)$$

образующих определенным образом упорядоченную последовательность

$$w^0, w^1, w^2, \dots, w^t, \dots \quad (33)$$

Фиксированное состояние системы описывается вектором значений электропотребления объектов техноценоза ( $n$  – общее количество объектов) на  $t$ -ом временном интервале ( $t = 0$  – последний известный год предыстории;  $t = 1, 2, 3, \dots$  – модельные временные интервалы, как правило, часы, дни, месяцы, годы). Очевидно, что подобная постановка задачи динамического программирования является лишь частной, предполагающей, что мы пренебрегаем многомерностью множества переменных состояния, а также фрактальностью кластеризации техноценоза на объекты. Однако известно, что в настоящее время без подобного упрощения практически невозможно добиться численного решения задачи.

Каждое изменение состояния исследуемой системы – техноценоза дается конечно-разностными уравнениями состояния [5,10]:

$$\begin{cases} w_i^{t+1} = f_i(w_1^t, w_2^t, w_3^t, \dots, w_n^t; u_1^{t+1}, u_2^{t+1}, u_3^{t+1}, \dots, u_n^{t+1}), \\ i = 1, 2, 3, \dots, n; \\ w^{t+1} = f(w^t, u^{t+1}). \end{cases} \quad (34)$$

Здесь управляющая переменная

$$u^{t+1} \equiv \{u_1^{t+1}, u_2^{t+1}, u_3^{t+1}, \dots, u_n^{t+1}\} \quad (35)$$

определяет последовательность решений (стратегий), изменяющих  $t$ -ую систему состояний в  $(t + 1)$ -ую. Следует отметить, что в общем случае число членов множества управляющих переменных может отличаться от числа членов множества переменных состояния. Однако для конкретизации задачи предположим их равенство, что наложит некоторые ограничения на алгоритм программной реализации, о чем будет сказано ниже.

Как известно [10], если задано начальное состояние  $w^0$  и некоторое множество ограничений (равенств или неравенств) для переменных состояния и управления, то задача заключается в нахождении оптимальной стратегии  $u^1, u^2, u^3, \dots, u^L$  (оптимальной экстремали для общего случая вариационного исчисления), минимизирующей критерий-функционал:

$$\begin{aligned} \min_{u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)} \int_{t_0}^{t_F} f_0(w_1, w_2, \dots, w_n; u_1, u_2, \dots, u_n) dt &\equiv \\ \equiv S(w_1(t_0), w_2(t_0), \dots, w_n(t_0); w_1(t_F), w_2(t_F), \dots, w_n(t_F)) &\equiv \\ \equiv S(W_1, W_2, \dots, W_n), & \end{aligned} \quad (36)$$

удовлетворяющий дифференциальному уравнению с частными производными первого порядка (уравнение Гамильтона – Якоби, основанное на классическом гамильтониане с обобщенными координатами [10]):

$$M \left( W_1, W_2, W_3, \dots, W_n; \frac{\partial S}{\partial w_1}, \frac{\partial S}{\partial w_2}, \frac{\partial S}{\partial w_3}, \dots, \frac{\partial S}{\partial w_n} \right) = 0, \quad (37)$$

где  $M$  – оптимальная (максимизированная) функция Гамильтона.

Как известно [10], в случае задачи шагового управления (в условиях дискретного времени, характерного для класса моделей оптимального управления электропотреблением техноценозов) интегральный функционал (36) вырождается в аддитивный критерий, минимизирующий

$$w_0^L = \sum_{t=0}^{L-1} (f_0(w^t, u^{t+1})) + f(w^L) = w_0^L(w^0), \quad (38)$$

где  $L = 1, 2, \dots$  – количество рассматриваемых в данной постановке шагов динамического программирования;

$f(w^L)$  – функция состояния системы на последнем шаге.

Принцип оптимальности Беллмана для данной постановки заключается в следующем. Если  $u^1, u^2, u^3, \dots, u^L$  – некоторая оптимальная стратегия управления для последовательности состояний  $w^0, w^1, w^2, \dots, w^L$  в задаче динамического программирования с определенным начальным состоянием  $w^0$ , то  $u^2, u^3, u^4, \dots, u^L$  и есть оптимальная стратегия для тех же критерия-функции и конечного состояния  $w^L$ , но с начальным состоянием  $w^1$ . Если обозначить  $\min(x_0^L(X))$  через  $S^L(X)$ , то принцип оптимальности Беллмана для данной постановки выражается рекуррентным соотношением (где минимум определяется с задаваемыми ограничениями) [10]:

$$\begin{cases} S^L(X) = \min_{u^1} \{f_0(X, u^1) + S^{L-1} \cdot f(X, u^1)\} (L = 2, 3, 4, \dots); \\ S^1(X) = \min_{u^1} (f_0(X, u^1)). \end{cases} \quad (39)$$

Численное решение данного функционального уравнения с неизвестными функциями  $S^L(X)$  заключается в шаговой конструкции класса оптимальных стратегий для некоторого класса начальных состояний. Ожидаемая оптимальная стратегия «погружена» в этом классе [10].

Рекуррентное соотношение (39) позволяет задать оптимальную стратегию управления электропотреблением техноценоза, заключающуюся в следующем. Управляющее воздействие, направленное на снижение электропотребления, для каждого объекта на каждом временном интервале должно быть поставлено в зависимость от потенциала энергосбережения объекта. При этом численным индикатором потенциала энергосбережения является относительная разность между эмпирическим значением электропотребления на данном временном интервале и значением на нижней границе области допустимых значений, соответствующим рангу рассматриваемого объекта (т.е. его относительный дифлекс-параметр). Следова-

тельно, в общем случае оптимальное управляющее воздействие для  $k$ -го объекта техноценоза можно выразить следующим образом:

$$w_k^{t+1} = K_k^t \cdot w_k^t, \quad (40)$$

где  $K_k^t$  – индивидуальный нормирующий коэффициент для  $k$ -го объекта техноценоза на  $t$ -ом временном интервале.

В соответствии с принятым принципом оптимальности индивидуальный нормирующий коэффициент управляющего воздействия  $K_k^t$  можно задать как функционал  $f_k^t(w_k^t, u^{t+1})$ , окончательно доопределяемый в цифровом двойнике в зависимости от априорно принимаемых стратегий осуществления управляющего воздействия с целью снижения электропотребления техноценоза, а также существующих ограничений на этот счет во внешней системе управления. Численное решение функционального уравнения (39) для простейшего класса оптимальных стратегий управления, в конечном итоге реализующих обоснованное выше представление о качестве процесса электропотребления по критерию близости к нижней границе области допустимых значений (величине абсолютного топологического дифлекс-параметра), может быть представлено в виде [10]:

$$K_k^t = f_k^t \left( \frac{w_k^t - (W^t(r_k) - W^*(r_k))}{W^t(r_k) - W^*(r_k)} \right), \quad (41)$$

где  $f_k^t(w_k^t, u^{t+1})$  – функционал параметрического состояния;  
 $W^t(r_k)$  – соответствующее  $k$ -му рангу значение электропотребления на текущей аппроксимационной кривой рангового параметрического распределения;  
 $W^*(r_k)$  – соответствующее  $k$ -му рангу значение электропотребления на нижней границе области, получаемой по итогам ZP-нормирования (рис. 12) [10].

Таким образом, оптимальное управляющее воздействие для  $k$ -го объекта техноценоза на  $t$ -ом временном интервале  $w_k^{t+1}$ , рассчитываемое по выражению (40), может рассматриваться как интеллектуальная норма, учитывающая статистические особенности электропотребления объекта в составе техноценоза на обозримом временном этапе. Целью данной нормы (в системе с аналогичными нормами, предъявляемыми всем остальным объектам) является приведение техноценоза в указанный срок с наибольшей вероятностью к целевому состоянию, описываемому ранговым гиперпараметрическим распределением, форма которого минимизирует инте-



гральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Следует отметить, что подобное интеллектуальное нормирование одновременно содержит в себе элементы как целеполагания, так и построения стратегии достижения цели. Однако не менее важным элементом интеллектуального нормирования в техноценозе выступает планирование энергосбережения, в основу которого положено ZP-планирование – завершающая процедура ZP-анализа электропотребления (подробно показано на рис. 12).

## 7. Планирование энергосбережения

[на содержание]

Как известно, ZP-планирование представляет собой процедуру ZP-анализа электропотребления (рис. 12), заключающуюся в разработке ZP-плана и предусматривающую для каждого объекта на каждом временном интервале индивидуальные управляющие воздействия, направленные на энергосбережение и поставленные в зависимость от дифлекс-параметров. Осуществляемая в рамках ZP-анализа электропотребления процедура ZP-планирования может иметь различные стратегии, например: 1) достижение к заданному временному интервалу требуемого уровня снижения электропотребления; 2) достижение техноценозом уровня Z-потенциала энергосбережения (Z1 или Z2) к заданному временному интервалу [10].

Для реализации любой из стратегий требуется разработка ZP-плана энергосбережения, который предполагает предъявление каждому объекту техноценоза на каждом временном интервале интеллектуальной нормы снижения электропотребления. Методика разработки плана общая для всех простых 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) [10]:

$$\Delta W_k^{PL} = \frac{W(r_k) \cdot \Delta W^{PL}}{\int_0^{\infty} W(r) dr}, \quad (42)$$

где  $\Delta W^{PL}$  – величина, на которую в течение каждого временного интервала расчетного промежутка времени должно снижаться суммарное электропотребление;  
 $W(r_k)$  – текущее значение электропотребления k-го объекта;

$W(r)$  – аппроксимационная кривая, полученная для эмпирических значений электропотребления объектов на начальном этапе внедрения методики.

В соответствии с принципом оптимальности (41) норма ежегодного снижения электропотребления объекта должна быть поставлена в зависимость от степени близости текущего электропотребления объекта к нижней границе области допустимых значений, получаемой по итогам ZP-нормирования. Решать задачу определения интеллектуальной нормы предлагается с помощью весовых коэффициентов, получению которых предшествует расчет для каждого объекта 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 [10]:

$$W^{\Delta}(r_k) = \frac{|W(r_k) - W^*(r_k)|}{W(r_k)}, \quad (43)$$

где  $W^{\Delta}(r_k)$  – относительное отклонение значения электропотребления  $k$ -го объекта от величины, соответствующей его рангу на нижней границе области допустимых значений, получаемой по итогам ZP-нормирования;  
 $W^*(r_k)$  – значение электропотребления  $k$ -го объекта на нижней границе области допустимых значений.

Это позволяет для  $k$ -го объекта рассчитать весовой коэффициент:

$$\begin{cases} V_k^{PL} = W^{\Delta}(r_k) / \sum_{j=1}^n W_j^{\Delta}(r_k); \\ \sum_{k=1}^n V_k^{PL} = 1, \end{cases} \quad (44)$$

где  $V_k^{PL}$  – весовой коэффициент, рассчитанный для  $k$ -го объекта;  
 $n$  – общее количество объектов в техноценозе;  
 $j$  – вспомогательный формальный индекс суммирования.

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

$$\Delta \overline{W}_k^{PL} = \Delta W_k^{PL} + \Delta W_k^{PL} \cdot (V_k^{PL} - 0,5). \quad (45)$$

Смысл корректировки, при этом, заключается в следующем. Значение интеллектуальной 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 [10].

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 являются средства, выручаемые за счет экономии электроэнергии отдельными объектами. Объем средств зависит от действующего тарифа на электроэнергию:

$$C_k^{PL} = \Delta \overline{W}_k^{PL} \cdot sc(r_k), \quad (46)$$

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

Как представляется, поощрительная премия, выплачиваемая объекту за успешную экономию электроэнергии, в соответствии с принципом оптимальности (41), также должна быть поставлена в зависимость от степени близости электропотребления объекта к нижней границе области допустимых значений, получаемой по итогам ZP-нормирования. Решать задачу определения премии предлагается с помощью весовых коэффициентов, расчет которых осуществляется по методике, отличающейся от (44). Дело в том, что при определении интеллектуальной 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 весовой коэффициент будет равен [10]:

$$\begin{cases} V_k^{PR} = G_k / \sum_{j=1}^n G_{kj}; \\ G_k = 1 - W^\Delta(r_k) / \sum_{j=1}^n W_j^\Delta(r_k); \\ \sum_{k=1}^n V_k^{PR} = 1, \end{cases} \quad (47)$$

где  $V_k^{PR}$  – весовой коэффициент, рассчитанный для  $k$ -го объекта;  
 $G$  – вспомогательная переменная.

Индивидуальная доля премирования объекта техноценоза зависит от рассчитанного по выражению (47) 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 (первооружение и модернизацию электрооборудования):

$$\begin{cases} \bar{C}_k^{PR} = \gamma_1 \cdot (C_k^{PL} + C_k^{PL} \cdot (V_k^{PR} - 0,5)); \\ \bar{C}_k^{IN} = \gamma_2 \cdot (C_k^{PL} + C_k^{PL} \cdot (V_k^{PR} - 0,5)); \\ 0 \leq (\gamma_1 + \gamma_2) \leq 1, \end{cases} \quad (48)$$

где  $\bar{C}_k^{PR}$  – размер премии персоналу  $k$ -го объекта техноценоза за успехи в экономии электроэнергии;  
 $\bar{C}_k^{IN}$  – объем инвестиций в энергосбережение (первооружение и модернизацию электрооборудования)  $k$ -го объекта;  
 $\gamma_1, \gamma_2$  – 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 долю премирования персонала в общем фонде энергосбережения техноценоза (из расчета на один временной интервал) [10]:

$$\bar{C}_k^{PL} = \bar{C}_k^{PR} + \bar{C}_k^{IN}. \quad (49)$$

Небольшой небаланс в текущем временном интервале, который может возникнуть в процессе применения выражений (45) и (48), будет скор-

ректирован 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 будет постоянно происходить пересчет весовых коэффициентов и, соответственно, перераспределение премиальных средств в пользу тех объектов, которые на данный момент достигнут больших успехов в деле экономии электроэнергии.

Различие в простых 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 – выражение для расчета выглядит следующим образом [10]:

$$\Delta W^{PL} = \frac{K^{PL} \cdot \int_0^{\infty} W(r) dr}{100 \cdot T}, \quad (50)$$

где  $K^{PL}$  – плановый коэффициент – задаваемая в процентах норма снижения электропотребления техноценоза;  
 $T$  – время реализации планового коэффициента (задается 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 техноценоза рассчитывается следующим образом [10]:

$$\Delta W^{PL} = \frac{\int_0^{\infty} W(r) dr - \int_0^{\infty} W^*(r) dr}{T}, \quad (51)$$

где  $W^*(r)$  – нижняя граница области допустимых значений, получаемой по итогам ZP-нормирования техноценоза (при необходимости может быть использована граница, рассчитанная для Z1 или Z2-потенциала);  
 $T$  – в данном случае – время достижения техноценозом потенциала энергосбережения требуемого уровня (рассчитываемого для Z1 или Z2-потенциала).

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 показатель конверсии может быть рассчитан только по итогам двух и более временных интервалов ZP-анализа. Для  $k$ -го объекта можно записать [10]:

$$\Pi_k^{t+1} = \frac{W_k^t - W_k^{t+1}}{\bar{C}_k^{PL(t)}}, \quad (52)$$

где  $\Pi_k^{t+1}$  – показатель конверсии  $k$ -го объекта техноценоза на  $(t+1)$ -ом временном интервале (измеряется в кВт·ч за временной интервал на денежную единицу);  
 $W_k^t$  – электропотребление  $k$ -го объекта на  $t$ -ом интервале;  
 $W_k^{t+1}$  – электропотребление  $k$ -го объекта техноценоза на  $(t+1)$ -ом временном интервале;  
 $\bar{C}_k^{PL(t)}$  – объем премиальных средств, определенных по итогам процедуры ZP-планирования и вложенных в объект на  $t$ -ом временном интервале.

Соотнесение показателя конверсии  $k$ -го объекта техноценоза с суммой данных показателей для всех объектов техноценоза позволяет получить коэффициент конверсии, имеющий смысл весового коэффициента (рассчитывается отдельно для каждого временного интервала) [10]:

$$V_k^{PL(t)} = \Pi_k^t / \sum_{j=1}^n \Pi_j^t, \quad (53)$$

где  $V_k^{PL(t)}$  – коэффициент конверсии  $k$ -го объекта техноценоза на  $t$ -ом временном интервале;  
 $\Pi_k^t$  – показатель конверсии  $k$ -го объекта на  $t$ -ом интервале;  
 $j$  – формальный индекс суммирования.

В процедуре ZP-планирования коэффициент конверсии может быть использован вместо или совместно с коэффициентами, рассчитываемыми по выражениям (44) и (47). При этом в (45) и (48) будут применяться не-

сколько видоизмененные весовые коэффициенты вида (с учетом сохранения соответствующих нормировочных условий) [10]:

$$\begin{cases} \bar{V}_k^{PL} = \xi_1 \cdot V_k^{PL} + \xi_2 \cdot V_k^{IL}; \\ \bar{V}_k^{PR} = \xi_3 \cdot V_k^{PR} + \xi_4 \cdot V_k^{IL}; \\ \xi_1 + \xi_2 = 1; \xi_3 + \xi_4 = 1, \end{cases} \quad (54)$$

где  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  – веса, применяемые при пересчете весовых коэффициентов  $V_k^{PL}$  и  $V_k^{PR}$  (определяются, как правило, на основе априорной экспертной информации) [10].

Показатель конверсии может быть рассчитан и для техноценоза в целом. При этом на  $(t + 1)$ -ом временном интервале будем иметь [10]:

$$\Pi_{\Sigma}^{t+1} = \frac{\int_0^{\infty} W^t(r) dr - \int_0^{\infty} W^{t+1}(r) dr}{\sum_{k=1}^n \left( \bar{C}_k^{PR(t)} + \bar{C}_k^{IN(t)} \right)}, \quad (55)$$

где  $\Pi_{\Sigma}^{t+1}$  – совокупный показатель конверсии техноценоза в целом на  $(t + 1)$ -ом временном интервале (также измеряется в кВт·ч\Т на денежную единицу);  
 $W^t(r)$  – аппроксимированное ранговое параметрическое распределение объектов техноценоза по электропотреблению, полученное на  $t$ -ом временном интервале;  
 $W^{t+1}(r)$  – ранговое параметрическое распределение объектов техноценоза на  $(t + 1)$ -ом временном интервале;  
 $\bar{C}_k^{PR(t)}$  – объем средств, израсходованных на премии персоналу  $k$ -ого объекта на  $t$ -ом временном интервале;  
 $\bar{C}_k^{IN(t)}$  – объем средств, инвестированных в модернизацию и перевооружение электрооборудования  $k$ -ого объекта техноценоза на  $t$ -ом временном интервале.

Совокупный показатель 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 (50)

или (51). Однако в процессе реализации стратегии на каждом временном интервале осуществляется мониторинг конверсии. При этом циклический процесс ZP-анализа завершается при достижении показателем конверсии априорно заданного минимального уровня [10].

Следует отметить, что показатель конверсии является важной динамической характеристикой процесса управления электропотреблением объектов техноценоза. Более глубокий экстремальный анализ показателя конверсии может охарактеризовать состояние техноценоза в целом и его объектов по отдельности с точки зрения их восприимчивости к управляющим воздействиям, направленным на энергосбережение. Как представляется, на начальном этапе реализации процесса управления электропотреблением объекты будут активно реагировать на управляющие воздействия, что в процессе мониторинга даст большие значения показателя конверсии. Однако со временем данный показатель станет неотвратно снижаться, и системе управления важно своевременно уловить момент завершения очередного цикла с обязательным переходом на новую стратегию.

По мере накопления практического опыта внедрения методики оптимального управления электропотреблением на объектах техноценоза появляется возможность моделирования и реализации более сложных экстремальных стратегий ZP-планирования. Для этого требуется создание дополнительных слоев цифрового двойника, содержащих реальные результаты электропотребления и затрат на энергосбережение объектов [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{(W_1^1, W_1^{\Delta 1}, C_1^1); (W_1^2, W_1^{\Delta 2}, C_1^2) \dots (W_1^t, W_1^{\Delta t}, C_1^t) \dots (W_1^m, W_1^{\Delta m}, C_1^m)\}; \\ \{(W_2^1, W_2^{\Delta 1}, C_2^1); (W_2^2, W_2^{\Delta 2}, C_2^2) \dots (W_2^t, W_2^{\Delta t}, C_2^t) \dots (W_2^m, W_2^{\Delta m}, C_2^m)\}; \\ \{(W_3^1, W_3^{\Delta 1}, C_3^1); (W_3^2, W_3^{\Delta 2}, C_3^2) \dots (W_3^t, W_3^{\Delta t}, C_3^t) \dots (W_3^m, W_3^{\Delta m}, C_3^m)\}; \\ \dots \\ \{(W_k^1, W_k^{\Delta 1}, C_k^1); (W_k^2, W_k^{\Delta 2}, C_k^2) \dots (W_k^t, W_k^{\Delta t}, C_k^t) \dots (W_k^m, W_k^{\Delta m}, C_k^m)\}; \\ \dots \\ \{(W_n^1, W_n^{\Delta 1}, C_n^1); (W_n^2, W_n^{\Delta 2}, C_n^2) \dots (W_n^t, W_n^{\Delta t}, C_n^t) \dots (W_n^m, W_n^{\Delta m}, C_n^m)\}, \end{array} \right. \quad (56)$$

где  $W_k^t$  – электропотребление k-го объекта на t-ом интервале;  
 $C_k^t$  – затраты на реализацию процедур оптимального управления электропотреблением k-го объекта на t-ом временном интервале (могут быть приняты равными объему премиальных средств в техноценозе, определенных по итогам процедуры ZP-планирования);  
 $W_k^{\Delta t}$  – расчетный дифлекс-параметр k-го объекта на t-ом временном интервале (рассчитывается относительно нижней границы соответствующего Z-потенциала);



- $m$  – количество рассматриваемых временных интервалов;  
 $n$  – общее количество объектов в техноценозе.

Значения электропотребления в матрице (56) не ранжируются, а записываются в том порядке, в котором они были проранжированы на первом временном интервале. Одновременно с (56) создаются слои показателей конверсии техноценоза и тарифов на электроэнергию:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{\Pi_1^1, \Pi_1^2, \Pi_1^3, \dots, \Pi_1^t, \Pi_1^{t+1}, \dots, \Pi_1^m\}; \\ \{\Pi_2^1, \Pi_2^2, \Pi_2^3, \dots, \Pi_2^t, \Pi_2^{t+1}, \dots, \Pi_2^m\}; \\ \dots \\ \{\Pi_k^1, \Pi_k^2, \Pi_k^3, \dots, \Pi_k^t, \Pi_k^{t+1}, \dots, \Pi_k^m\}; \\ \dots \\ \{\Pi_n^1, \Pi_n^2, \Pi_n^3, \dots, \Pi_n^t, \Pi_n^{t+1}, \dots, \Pi_n^m\}; \\ \{\Pi_\Sigma^1, \Pi_\Sigma^2, \Pi_\Sigma^3, \dots, \Pi_\Sigma^t, \Pi_\Sigma^{t+1}, \dots, \Pi_\Sigma^m\}; \end{array} \right. \quad (57)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{sc_1^1, sc_1^2, sc_1^3, \dots, sc_1^t, sc_1^{t+1}, \dots, sc_1^m\}; \\ \{sc_2^1, sc_2^2, sc_2^3, \dots, sc_2^t, sc_2^{t+1}, \dots, sc_2^m\}; \\ \dots \\ \{sc_k^1, sc_k^2, sc_k^3, \dots, sc_k^t, sc_k^{t+1}, \dots, sc_k^m\}; \\ \dots \\ \{sc_n^1, sc_n^2, sc_n^3, \dots, sc_n^t, sc_n^{t+1}, \dots, sc_n^m\}; \\ \{sc_\Sigma^1, sc_\Sigma^2, sc_\Sigma^3, \dots, sc_\Sigma^t, sc_\Sigma^{t+1}, \dots, sc_\Sigma^m\}, \end{array} \right. \quad (58)$$

- где  $\Pi_k^t$  – показатель конверсии  $k$ -го объекта техноценоза на  $t$ -ом временном интервале;  
 $\Pi_\Sigma^t$  – совокупный показатель конверсии техноценоза на  $t$ -ом временном интервале;  
 $sc_k^t$  – тариф на электроэнергию, предъявляемый  $k$ -му объекту техноценоза на  $t$ -ом временном интервале;  
 $sc_\Sigma^t$  – усредненный тариф на электроэнергию, предъявляемый техноценозу на  $t$ -ом временном интервале (может определяться как средневзвешенный тариф по объектам).

Усредненный тариф на электроэнергию определяется как среднее от тарифов, предъявляемых объектам техноценоза на  $t$ -ом интервале:

$$sc_{\Sigma}^t = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n sc_k^t. \quad (59)$$

Анализ цифровых слоев, формально расписанных в матрицах (56) – (58), позволяет отдельно для  $k$ -го объекта и для техноценоза в целом аппроксимировать важные динамические функции, а также получить их первые производные по времени. Все это позволяет сформировать ZP-куб данных априорной информации для последующего ZP-планирования:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_1(\tau); W_1^{\Delta}(\tau); C_1(\tau); sc_1(\tau); \frac{dW_1(\tau)}{d\tau}; \frac{dW_1^{\Delta}(\tau)}{d\tau}; \frac{dC_1(\tau)}{d\tau}; \frac{dsc_1(\tau)}{d\tau}\}; \\ \{W_2(\tau); W_2^{\Delta}(\tau); C_2(\tau); sc_2(\tau); \frac{dW_2(\tau)}{d\tau}; \frac{dW_2^{\Delta}(\tau)}{d\tau}; \frac{dC_2(\tau)}{d\tau}; \frac{dsc_2(\tau)}{d\tau}\}; \\ \dots \\ \{W_k(\tau); W_k^{\Delta}(\tau); C_k(\tau); sc_k(\tau); \frac{dW_k(\tau)}{d\tau}; \frac{dW_k^{\Delta}(\tau)}{d\tau}; \frac{dC_k(\tau)}{d\tau}; \frac{dsc_k(\tau)}{d\tau}\}; \\ \dots \\ \{W_n(\tau); W_n^{\Delta}(\tau); C_n(\tau); sc_n(\tau); \frac{dW_n(\tau)}{d\tau}; \frac{dW_n^{\Delta}(\tau)}{d\tau}; \frac{dC_n(\tau)}{d\tau}; \frac{dsc_n(\tau)}{d\tau}\}; \\ \{W_{\Sigma}(\tau); W_{\Sigma}^{\Delta}(\tau); C_{\Sigma}(\tau); sc_{\Sigma}(\tau); \frac{dW_{\Sigma}(\tau)}{d\tau}; \frac{dW_{\Sigma}^{\Delta}(\tau)}{d\tau}; \frac{dC_{\Sigma}(\tau)}{d\tau}; \frac{dsc_{\Sigma}(\tau)}{d\tau}\}, \end{array} \right. \quad (60)$$

где  $\tau$  – непрерывная переменная времени;  
 $W_{\Sigma}(\tau)$  – функция времени суммарного электропотребления объектов техноценоза  $\left( W_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n W_k \right)$ ;  
 $W_{\Sigma}^{\Delta}(\tau)$  – функция времени суммарного расчетного дифлекса параметра объектов техноценоза  $\left( W_{\Sigma}^{\Delta} = \sum_{k=1}^n W_k^{\Delta} \right)$ ;  
 $C_{\Sigma}(\tau)$  – функция времени суммарных затрат на реализацию процедур оптимального управления электропотреблением на объектах техноценоза  $\left( C_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n C_k \right)$ ;

$sc_{\Sigma}(\tau)$  – функция времени усредненного тарифа на электроэнергию, предъявляемого техноценозу  $\left( sc_{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n sc_k \right)$ .

Информация, сосредоточенная в ZP-кубе данных (60), может быть использована в качестве исходной для решения двух взаимосвязанных задач управления: 1) имитационное моделирование электропотребления техноценоза; 2) информационное обеспечение экстремальной стратегии ситуационного управления электропотреблением объектов техноценоза.

Первая задача, заключающаяся в моделировании электропотребления, решается с помощью описанных в [10] преобразующих функций, параметры которых получаются путем статистической обработки данных из матриц (56) – (60). При моделировании возможна отработка инерционного сценария развития техноценоза, а также различных сценариев, связанных с управляющим воздействием, формирующимся с помощью аппарата трансформированных ранговых параметрических распределений [10].

Как было заявлено, экстремальная стратегия ситуационного управления электропотреблением объектов техноценоза связана с нахождением оптимальной стратегии (оптимальной экстремали для общего случая вариационного счисления), минимизирующей критерий-функционал (36), удовлетворяющий уравнению Гамильтона – Якоби (37). В условиях дискретного времени, с учетом полученного ранее критерия эффективности оптимального управления электропотреблением техноценоза (см. (28) – (31)), численное решение функционального уравнения (38) заключается в шаговой конструкции класса оптимальных стратегий для некоторого класса начальных состояний. В условиях численной реализации (единственно возможной в условиях рассматриваемой задачи), при решении вариационной задачи с «закрепленными концами» применительно к исходным данным, сосредоточенным в матрицах (56) – (60), критерий-функционал (36) вырождается в аддитивный критерий вида [10]:

$$IP(\{W_k^t\}, \{C_k^t\}, \{sc_k^t\}) = \sum_{t=1}^m \sum_{k=1}^n \left( \frac{W_k^1 \cdot sc_k^1 - W_k^{t+1} \cdot sc_k^{t+1}}{W_k^{\Delta 1} \cdot sc_k^1 + C_k^{t+1}} \right) \rightarrow \max, \quad (61)$$

где  $\{W_k^t\}$  – матрица значений электропотребления k-го объекта техноценоза на t-ом временном интервале;  
 $\{C_k^t\}$  – матрица соответствующих затрат на реализацию процедур оптимального управления электропотреблением;  
 $\{sc_k^t\}$  – матрица значений тарифа на электроэнергию для k-го объекта техноценоза на t-ом временном интервале;

- $W_k^1$  – значение электропотребления  $k$ -го объекта на начальном этапе процесса моделирования;
- $W_k^{\Delta 1}$  – значение расчетного дифлекс-параметра  $k$ -го объекта на начальном этапе моделирования;
- $sc_k^1$  – значение тарифа, предъявляемого  $k$ -му объекту на начальном этапе моделирования.

Постановка задачи ситуационного управления в данном случае выглядит следующим образом. Требуется за расчетное число временных интервалов ( $t = 1 \dots m$ ) привести электропотребление техноценоза, включающего  $n$ -объектов, из начального состояния, характеризующегося вектором значений электропотребления  $\{W_k^1, k = 1 \dots n\}$ , в конечное, описываемое вектором  $\{W_k^1 - W_k^{\Delta 1}, k = 1 \dots n\}$ . При этом, варьируя векторами текущих значений электропотребления  $\{W_k, k = 1 \dots n\}$  и текущих затрат на управление электропотреблением  $\{C_k, k = 1 \dots n\}$ , а также матрицей тарифов на электроэнергию  $\{sc_k^t, t = 1 \dots m, k = 1 \dots n\}$ , требуется максимизировать аддитивный критерий  $IP(\{W_k^t\}, \{C_k^t\}, \{sc_k^t\})$ , записанный в (61).

Некоторое упрощение задачи может быть достигнуто выведением из числа переменных варьирования матрицы тарифов на электроэнергию. При этом получаем, так называемый, сценарный вариант, когда оптимизация осуществляется только по двум переменным, однако несколько раз – применительно к различным фиксированным тарифным матрицам, отражающим вероятные сценарии развития ситуации на рынке электроэнергии. Как правило, используются понятия, так называемых, «оптимистического», «пессимистического» и «инерционного» сценариев. В ряде случаев, когда на то имеются весомые основания, могут рассматриваться один или несколько «бифуркационных» сценариев. В любом случае, в качестве решения задачи должны быть получены две матрицы: значений электропотребления  $\{W_k^t, t = 1 \dots m, k = 1 \dots n\}$  и текущих затрат на управление электропотреблением  $\{C_k^t, t = 1 \dots m, k = 1 \dots n\}$ . По сути, это не что иное, как оптимальный ZP-план энергосбережения объектов техноценоза.

После точной постановки задачи ситуационного управления перейдем собственно к методологии оптимизационного процесса. Как было показано в [10], в условиях данной постановки, достаточно эффективным (и, видимо, единственно возможным) является метод наискорейшего подъема с использованием одномерного поиска. В качестве конечного аналитического ядра целевой функции оптимизации принимается формируемый имитационной моделью управления электропотреблением техноценоза интегральный показатель эффективности  $IP$ . В соответствии с критерием (61), в процессе оптимизации функция должна максимизироваться:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^t \phi(\{W_k^j\}) \xrightarrow{t=1..m} \max, \\ \phi(\{W_k^j\}) = \sum_{k=1}^n \left( \frac{W_k^1 \cdot sc_k^1 - W_k^j \cdot sc_k^j}{W_k^{\Delta 1} \cdot sc_k^1 + (W_k^{j-1} - W_k^j) \cdot sc_k^j} \right); \\ \phi(\{W_k^{j=1}\}) = 0; \\ W_k^1 - W_k^j \leq W_k^{\Delta 1}, k = 1 \dots n; \\ W_{\Sigma}^1 - W_{\Sigma}^j \leq W_{\Sigma}^{\Delta}, k = 1 \dots n; j = 1 \dots (t + 1), \end{array} \right. \quad (62)$$

где  $\phi(\{W_k^j\})$  – целевая функция на  $j$ -ом этапе итерационного процесса оптимизации;  
 $j$  – формальная переменная суммирования.

К системе (62) необходимо сделать ряд пояснений. Во-первых, рекуррентное критериальное выражение, записанное в первой и второй строках, является однопараметрическим вырожденным вариантом критерия (61), учитывающим линейную связь между параметрами электропотребления и затрат на энергосбережение ( $C_k^{j+1} = (W_k^{j-1} - W_k^j) \cdot sc_k^j$ ), а также принцип оптимальности Беллмана и фиксированный сценарий тарифной политики на рынке электроэнергии. Во-вторых, ограничение, записанное в четвертой строке, определяет условие завершения корректировки значения электропотребления любого объекта техноценоза, удовлетворяющего данному условию. В-третьих, ограничение, записанное в пятой строке, задает условие полной остановки оптимизационного процесса [10].

Таким образом, ключевым в процессе управления в рамках цифровой платформы энергоэффективности выступает интеллектуальное нормирование, под которым понимается процедура оптимального управления электропотреблением техноценоза, заключающаяся в определении индивидуальных динамических норм, учитывающих статистические особенности электропотребления объектов в составе техноценоза на обозримом временном этапе. Целью интеллектуального нормирования является приведение техноценоза в указанный срок с наибольшей вероятностью к целевому состоянию, описываемому ранговым гиперпараметрическим распределением, форма которого минимизирует интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Интеллектуальное нормирование содержит в себе элементы целеполагания, планирования ресурсов и построения стратегии достижения цели. Оно является важным инструментом практической реализации управленческих процедур, реализуемых в рамках обоснованной здесь выше цифровой платформы энергоэффективности.

## **Заключение** [на содержание]

Предлагается дополнить концепцию интернета энергии новым понятием цифрового двойника техноценоза по электропотреблению, под которым понимается постоянно меняющийся под воздействием программного функционала техноценоза цифровой профиль, содержащий актуальное хранилище цифровых двойников электропотребления, кубированных в кортеж цифровых векторов рангов (объектов). Цифровой профиль электропотребления – набор процедур рангового анализа, ориентированных на выполнение задачи цифровизации электропотребления техноценоза. Цифровой двойник электропотребления – постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий актуальные адаптированные слои данных, являющиеся результатом циклической реализации программного функционала техноценоза на OLAP-кубе данных по электропотреблению. Цифровой слой данных техноценоза является основной горизонтальной структурной единицей OLAP-куба, под которым понимается многомерный, долговременно хранимый массив данных техноценоза по электропотреблению, используемый в процессе интерактивного анализа на платформе энергоэффективности. Программный функционал техноценоза – кортеж преобразователей и агрегаторов, предназначенных для реализации статической, динамической и бифуркационной моделей, а также процедуры обратной адаптации на OLAP-кубе данных техноценоза по электропотреблению. Основным требованием, предъявляемым к цифровизации электропотребления, является управляемость процесса потребления электроэнергии с использованием процедур интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования, а также соответствующих тонких дополнений дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализа. Преобразование OLAP-куба, при котором отдельные его двумерные слои разворачиваются в трехмерные кубы данных, позволяет получить четырехмерный объект, который предлагается называть тессерактом техноценоза по электропотреблению. Тессеракт данных техноценоза по электропотреблению – четырехмерный, долговременно хранимый массив данных, в котором четвертое измерение формируется за счет темпорально согласованных гиперпараметров. Ключевым в процессе управления в рамках цифровой платформы энергоэффективности выступает интеллектуальное нормирование, под которым понимается процедура оптимального управления электропотреблением техноценоза, заключающаяся в определении индивидуальных динамических норм, учитывающих статистические особенности электропотребления объектов в составе техноценоза на обозримом временном этапе. Оно является важным инструментом практической реализации управленческих процедур, реализуемых в цифровой платформе энергоэффективности.

## Список литературы [на содержание]

1. Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – М.: [б.и.], [2000]. – Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].
2. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Статья] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2012]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf>, свободный.
3. Меркулов А.А. Универсальный паттерн организации ситуационных центров [Статья] / А.А. Меркулов, А.В. Колесников. – М.: [Системы и средства информатики], [2013]. – <http://gnatukvi.ru/index.files/pattern.pdf>.
4. Гнатюк В.И., Луценко Д.В. Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. – М.: Изд-во ИНИ РАН, 2013. – 107 с.
5. Гнатюк В.И. Потенциал энергосбережения техноценоза [Трактат] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2013]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf>, свободный.
6. Гнатюк В.И. Философские основания техноценологического подхода [Монография] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: [http://gnatukvi.ru/mono\\_pdf/text.pdf](http://gnatukvi.ru/mono_pdf/text.pdf).
7. Гнатюк, В.И. Об электропотреблении [Статья] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [б.и.], [2017]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/elektropotr.pdf>, свободный.
8. Луценко Д.В. Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат] / Д.В. Луценко. – Электронные данные. – Калининград: [КИЦ «Техноценоз»], [2018]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>, свободный.
9. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ [Трактат] / О.Р. Кивчун. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [КИЦ «Техноценоз»], [2019]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>, свободный.
10. 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.
11. 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.
12. Холкин Д.В. Люди цифры. Шесть взглядов на новую энергетику [Монография] / Д.В. Холкин. – М.: [Литагент Ридеро], [2020]. – 220 с.