

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ РАНГОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

В.И. Гнатюк

Следует отметить, что в книге [11] достаточно полно изложены достижения нашей научной школы за последние двадцать пять лет [1-13]. В данной статье рассмотрим перспективы развития теории оптимального управления электропотреблением техноценозов. Напомним, что она развивалась в четыре этапа, на первом из которых была создана статическая модель оптимального управления электропотреблением (см. пп. 4.1, 5.1 и 5.3 в [11]). Стандартными процедурами модели стали интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование и потенширование, которые с целью уточнения уже на втором этапе были дополнены тонкими процедурами дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования), ASR-анализа (на этапе нормирования) и ZP-анализа (на этапе потенширования) (рис. 1). 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. 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 (п. 4.2 в [11]). 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 (пп. 4.3 и 5.3 в [11]). Это позволило существенно расширить горизонт прогнозирования и заложить научные основы для реализации внутренних управленческих обратных связей. Однако и в динамической модели 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.

Таким образом, актуальная научная проблема развития динамической адаптивной модели электропотребления за счет ее дополнения внешними управляющими воздействиями породила новое теоретическое направление, основным содержанием которого является исследование процессов электропотребления техноценозов на так называемых бифуркационных этапах. Введение и всестороннее обоснование принципиально ново-

го понятия бифуркации по электропотреблению позволило дополнить теорию оптимального управления электропотреблением процедурами потенцирования на основе Z3-потенциала энергосбережения, потенцирования с учетом номенклатурных ограничений, МС-прогнозирования, режимного нормирования и DC-анализа, а математический аппарат рангового анализа новым понятием трансформированного рангового параметрического распределения (рис. 1). В прикладном плане новый подход к методологии оптимального управления электропотреблением порождает весьма широкие перспективы по созданию специализированных программно-аппаратных комплексов (в пределе – ситуационных центров), которые могут найти применение, как в региональных энергосетевых, энергосервисных и энергосбытовых компаниях, так и в электротехнических комплексах регионов, городов, муниципальных образований, предприятий и организаций. Именно эти аспекты и рассматриваются в качестве ключевых направлений развития нашей научной школы на обозримую перспективу.



Рис. 1. Процедуры оптимального управления электропотреблением техноценоза

Рассмотрим подробнее содержание четвертого этапа развития теории оптимального управления электропотреблением. Итак, управление электропотреблением в техноценозе, при определенных условиях, может осуществляться на основе применения так называемого трансформированного рангового распределения, под которым понимается распределение Ципфа в ранговой дифференциальной форме, полученное в результате целенаправленного изменения его формы, что позволяет учесть внешнее управляющее воздействие и, тем самым, уточнить процедуры интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования. Трансформация распределения может осуществляться двумя основными способами: 1) изменением эмпирических значений параметров исходного табулированного рангового параметрического распределения с последующей повторной аппроксимацией; 2) пересчетом параметров формы исходной аппроксимационной кривой распределения (в простейшем случае – изменением значений первой точки и/или рангового коэффициента). Следует отметить, что первый способ трансформации находит применение в процедурах потенцирования на основе Z3-потенциала энергосбережения, потенцирования с учетом номенклатурных ограничений, режимного нормирования и DC-анализа, а второй – MC-прогнозирования.

Причины, по которым возникает необходимость трансформации ранговых параметрических распределений, могут быть самыми разными, однако все они связаны с необходимостью учета внешнего управляющего воздействия на техноценоз. Под внешним воздействием по электропотреблению понимается привнесение или изъятие из техноценоза добавочного ресурса по электропотреблению, являющееся следствием управленческих решений вышестоящей системы (в основном организационно-штатных) или резких изменений параметров окружающей среды (в основном погодных). В ряде наших работ показано, что следствием внешнего управляющего воздействия является бифуркация по электропотреблению [11,12].

Вообще бифуркация – это особый этап существования техноценоза, на котором устойчивое развитие сменяется неустойчивым состоянием. Вместо одной инерционной траектории возникают два или несколько новых (в т.ч. бифуркационных) путей возможного устойчивого развития. Выбор между ними определяется малыми воздействиями со стороны систем управления как самого техноценоза, так и внешних. Для анализа бифуркаций в оптимальном управлении электропотреблением вводятся понятия двух ранговых параметрических распределений по электропотреблению: инерционного – параметры которого определяются исключительно временным рядом предыстории развития техноценоза (в предположении, что бифуркация не происходит); бифуркационного – параметры которого, кроме предыстории, учитывают изменения в электропотреблении, происходящие в период бифуркации за счет внешнего воздействия. Очевидно,

что бифуркационное ранговое параметрическое распределение может быть получено путем видоизменения инерционного [11,12].

В упрощенном варианте бифуркация по электропотреблению предполагает только две траектории изменения: инерционную и бифуркационную. Суть бифуркации, с точки зрения процесса электропотребления, сводится к тому, что к совокупному электропотреблению техноценоза при инерционном варианте развития прибавляется (или вычитается) некоторая величина, называемая добавочным ресурсом и известная из предварительного анализа содержания управляющего воздействия. Очевидно, что при этом получается совокупное электропотребление техноценоза после начала бифуркации, которое в последующем используется для расчета параметров аппроксимационной формы бифуркационного рангового распределения. В конечном итоге, решение задачи получения бифуркационного распределения позволяет существенно уточнить все процедуры оптимального управления электропотреблением техноценоза (интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование и потенширование), а также тонкие дополнения к ним (дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализ) [11,12].

Основными задачами исследования электропотребления объектов техноценоза на бифуркационном этапе являются следующие: формирование временных интервалов, параметрическая фиксация и создание базы данных по электропотреблению; ранговый анализ объектов техноценоза по электропотреблению для доступного количества временных интервалов и построение инерционного рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению; расчет разностей рангов для каждого объекта на каждом временном интервале; мониторинг энтропии разностей рангов для техноценоза в целом на каждом временном интервале; определение тренда и тенденции энтропии разностей рангов; фиксация точек начала и завершения бифуркации по электропотреблению; контроль инерционного и бифуркационного этапов по электропотреблению; оценка добавочного ресурса по электропотреблению, возникающего как следствие внешнего управляющего воздействия и привносимого в техноценоз (изымаемого из него) в начале бифуркационного этапа; прогнозирование параметров и построение бифуркационного рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению; управление электропотреблением техноценоза на бифуркационном этапе [11,12].

Следует отметить, что в ряде работ нашей научной школы предлагается весьма точный метод фиксации бифуркационного этапа, основанный на понятии энтропии разности рангов [11-13]. Энтропия разностей рангов по электропотреблению – показатель, характеризующий степень неравномерности изменения рангов объектов при их движении на ранговой поверхности техноценоза по электропотреблению. Вычисляется как взятая с обратным знаком сумма произведений меры встречаемости конкретного значения разности рангов на логарифм данной меры. При этом суммиро-

вание производится по всем объектам, а в качестве меры берется относительная частота встречаемости конкретного значения разности рангов по электропотреблению в анализируемой выборке полученных значений разностей рангов объектов техноценоза на данном временном интервале.

Бифуркационный этап по электропотреблению – промежуток времени, в течение которого наблюдается выход тренда энтропии разностей рангов техноценоза за пределы тенденции энтропии разностей рангов. Под трендом энтропии разностей рангов понимается зафиксированный для техноценоза в целом на данном временном интервале наиболее характерный, свободный от случайных колебаний временной ряд значений энтропии разностей рангов по электропотреблению, получаемый методом непараметрического сглаживания. Тенденция энтропии разностей рангов – зафиксированное для техноценоза в целом на данном временном интервале общее направление изменения временного ряда значений энтропии разностей рангов. Статистически она описывается полосой, заключенной между 99 %-ми доверительными границами линейной функции, полученной для техноценоза в целом в результате параметрического сглаживания тренда энтропии разностей рангов по электропотреблению [11,12].

Анализ содержания процедур рангового анализа (включая их тонкие дополнения) позволил заключить, что на бифуркационном этапе развития техноценоза потребуется расчетное видоизменение формы рангового параметрического распределения по электропотреблению и переход от инерционного к бифуркационному распределению (рис. 2).

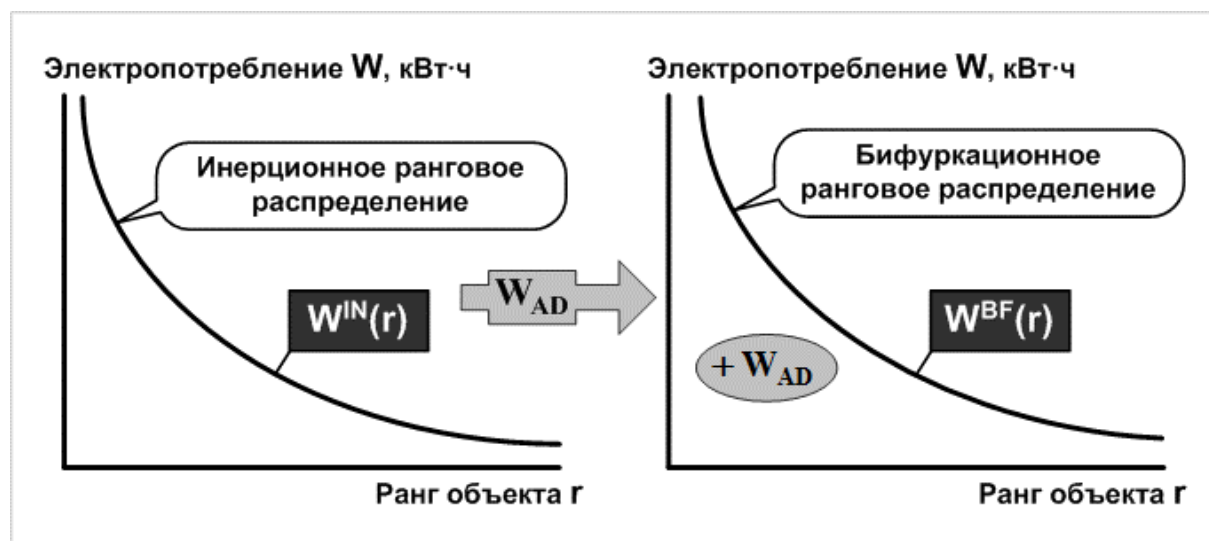


Рис. 2. Инерционное и бифуркационное ранговые распределения по электропотреблению

Рассмотрим методику видоизменения и предположим, что бифуркация происходит в момент времени τ . Она является следствием внешнего

управляющего воздействия и может выражаться в следующем: существенные оргштатные изменения (в т.ч. и в структуре объектов); изменение основного технологического процесса; строительство на территории техноценоза новых крупных потребителей электроэнергии или закрытие старых; значительная модернизация производственных мощностей; перестройка питающей энергосистемы или другие инфраструктурные изменения; резкое снижение промышленного производства в период экономического кризиса; значительные климатические колебания, как правило, не характерные для данных физико-географических условий; массовое разрушение части объектов в особый период в результате воздействия эвентуального противника, техногенной аварии или стихийного бедствия и др. Важно помнить, что с точки зрения параметра электропотребления, бифуркация всегда сводится к появлению в техноценозе (или убыли из него) совокупного параметрического ресурса, не являющегося простым «инерционным» следствием предыдущего временного ряда электропотребления. Математическая постановка задачи выглядит следующим образом [1,11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W^{IN}(r, \tau); W_{AD}(\tau)\} \xrightarrow{H_W^{BF}(\tau)} \{W^{BF}(r, \tau)\}; \\ \int_0^{\infty} W^{BF}(r, \tau) dr = \int_0^{\infty} W^{IN}(r, \tau) dr + W_{AD}(\tau); \\ Forec^t \{H_W\} \xrightarrow{t=\tau} H_W^{BF}(\tau); \\ H_W(\tau) \cong -\sum_{j=1}^s \left(\frac{W_{\Delta j}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)} \cdot \ln \left(\frac{W_{\Delta j}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)} \right) \right), \end{array} \right. \quad (1)$$

- где
- $W^{IN}(r, \tau)$ – инерционное ранговое параметрическое распределение техноценоза по электропотреблению в момент времени τ (r – ранг);
 - $W^{BF}(r, \tau)$ – соответствующее бифуркационное ранговое параметрическое распределение техноценоза по электропотреблению в момент времени τ ;
 - $W_{AD}(\tau)$ – добавочный ресурс в момент времени τ (величина, на которую в период бифуркации изменяется электропотребление техноценоза);
 - $H_W^{BF}(\tau)$ – параметрическая бифуркационная энтропия электропотребления техноценоза в момент времени τ ;
 - $Forec^t \{ \}$ – процедура прогнозирования (t – время);
 - $W_{\Delta}(\tau)$ – совокупное среднепараметрическое значение (по параметру электропотребления) для техноценоза, взятого в целом, в момент времени τ ;

- $W_{\Delta j}(\tau)$ – соответствующее среднепараметрическое значение, определенное для j -ой функциональной группы;
 s – количество функциональных групп в техноценозе.

Рассмотрим систему (1) подробнее. В данном случае задача заключается в том, что на основе имеющейся информации о параметрах формы инерционного рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению, а также величины, на которую в период бифуркации изменяется электропотребление техноценоза, требуется определить соответствующие параметры бифуркационного распределения (см. рис. 2). И ключевым здесь является понимание того, что, даже в условиях бифуркаций, свойство устойчивости формы ранговых распределений техноценоза задает прогнозируемость параметрической энтропии [1,11]. Данная постановка записана в первом и третьем выражениях системы (1).

Второе выражение является следствием закона оптимального построения техноценозов (см. пятое уравнение системы (3.23), п. 3.3 в [11]). В данном случае констатируется, что электропотребление техноценоза в целом на бифуркационном этапе равно сумме его электропотребления на инерционном этапе и величины, на которую в период бифуркации изменяется электропотребление техноценоза. Четвертое выражение (1) также является следствием закона оптимального построения (см. второе и третье уравнения системы (3.23) в [11]). В нем задается приближенный способ определения энтропии техноценоза по параметру электропотребления. В строгом понимании параметрическая энтропия есть сумма (по всем видам техники в момент времени τ) произведений вероятности встречаемости в

техноценозе i -го среднепараметрического значения $\frac{W_{\Delta i}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)}$ на меру среднепараметрического разнообразия популяции вида $\left(-\ln\left(\frac{W_{\Delta i}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)}\right) \right)$. Учи-

тывая, что в процедурах управления электропотреблением декомпозиция техноценоза осуществляется не по видам техники, а по объектам и функциональным группам (выражение (5.12) в [11]), предлагается вероятность встречаемости в техноценозе j -го среднепараметрического значения приближенно оценивать как отношение среднепараметрического значения, определенного для j -ой функциональной группы $W_{\Delta j}(\tau)$, к совокупному среднепараметрическому значению для техноценоза, взятого в целом, $W_{\Delta}(\tau)$ (погрешность приближения будет небольшой [1,11]).

Задача (1) упрощается при использовании двухпараметрической гиперболической аппроксимационной формы, остающейся, несмотря на критику, наиболее часто используемой в ранговом анализе [1-13]:

$$W(r) = W_1 \cdot r^{-\beta}, \quad (2)$$

где W_1, β – параметры (первая точка и ранговый коэффициент) двухпараметрической аппроксимационной формы рангового параметрического распределения.

При этом после преобразования (1) с учетом (2) получаем [1,11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_1^{\text{IN}}, \beta^{\text{IN}}\} \xrightarrow{H_W^{\text{BF}}} \{W_1^{\text{BF}}, \beta^{\text{BF}}\}; \\ \{W(r)\} \rightarrow \{W_1 \cdot r^{-\beta}\}; \\ n_{\text{BF}} = \text{const}; \\ \text{Forec} \{W_1 \text{ or } \beta\} \xrightarrow{H_W} W_1^{\text{BF}} \text{ or } \beta^{\text{BF}}; \\ W_{\Sigma}^{\text{IN}} + W_{\text{AD}} = \frac{W_1^{\text{BF}}}{1 - \beta^{\text{BF}}} (n_{\text{BF}}^{1 - \beta^{\text{BF}}} - 1), \end{array} \right. \quad (3)$$

где $W_1^{\text{IN}}, \beta^{\text{IN}}$ – параметры аппроксимационной формы инерционного рангового параметрического распределения;
 $W_1^{\text{BF}}, \beta^{\text{BF}}$ – соответствующие параметры бифуркационного рангового параметрического распределения;
 n_{BF} – количество объектов в техноценозе после завершения процесса бифуркации;
 W_{Σ}^{IN} – суммарное электропотребление объектов техноценоза при инерционном варианте развития.

Как и в системе (1), задача здесь заключается в том, чтобы на основе имеющейся информации о параметрах формы инерционного рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению, а также величины, на которую в период бифуркации изменяется электропотребление техноценоза, определить соответствующие параметры бифуркационного распределения (первое выражение системы). Однако в данном случае задача конкретизируется в условиях оперирования лишь двумя параметрами: первой точкой W_1 и ранговым коэффициентом β . Кроме того, предполагается, что в процессе бифуркации нам всегда остается известным один из ключевых параметров – количество объектов в техноценозе n_{BF} . Свойство устойчивости формы распределений техноценоза, в условиях применения двухпараметрической аппроксимационной формы, задает прогнозируемость параметров W_1 и β . При этом в процессе решения кон-

кретных задач прогнозируется лишь один из данных параметров (четвертое выражение системы (3)), а второй рассчитывается по основанному на законе оптимального построения техноценозов балансному уравнению, записанному здесь же в пятом выражении (см. (3.13), п. 3.1 в [11]).

После получения параметров бифуркационного рангового параметрического распределения по электропотреблению появляется возможность существенно улучшить все процедуры оптимального управления электропотреблением, а также тонкие дополнения к ним. Кроме того, могут быть решены следующие задачи: фиксация на бифуркационном ранговом распределении объектов, вновь появившихся в техноценозе; анализ последствий бифуркации по критерию жизнеспособности техноценоза по электропотреблению [1,11]; сравнение экономических показателей инерционного и бифуркационного вариантов развития техноценоза и др.

Задача определения параметров бифуркационного распределения в обеих ее постановках требует определения добавочного ресурса в виде значения функции времени $W_{AD}(\tau)$ в постановке (1) или константы W_{AD} в постановке (3). Нами впервые предлагаются пять способов определения добавочного ресурса, каждый из которых связан с определенной процедурой трансформации рангового распределения и лежит в основе перспективного направления развития научной школы. Еще раз перечислим данные процедуры: 1) потенцирование на основе понятия Z3-потенциала энергосбережения; 2) потенцирование с учетом номенклатурных ограничений; 3) МС-прогнозирование; 4) режимное нормирование; 5) DC-анализ (рис. 1) [1,11]. Добавочные ресурсы, определенные по каждой из перечисленных процедур, в сумме определяют результирующий добавочный ресурс W_{AD} , который затем используется в системах (1) и (3).

Последовательно рассмотрим каждый из способов определения добавочного ресурса по электропотреблению, первый из которых связан с процедурой потенцирования на основе понятия Z3-потенциала. Как представляется, по мере накопления практического опыта потенцирования и ZP-анализа на реальных техноценозах, возможна постановка вопроса об использовании в процессе ZP-нормирования удельных показателей энергоэффективности лучших мировых образцов. Это потребует введение понятия Z3-потенциала, под которым понимается потенциал энергосбережения техноценоза, получаемый так же, как и Z2-потенциал, после процедуры ZP-нормирования. Однако, при этом, пересчет электропотребления объектов внутри функциональных групп осуществляется на основе лучших мировых, а не лучших внутригрупповых, показателей (рис. 3). Основная сложность здесь будет в получении данных об удельном электропотреблении лучших мировых образцов, а собственно расчет потенциала будет осуществляться по выражению, аналогичному (5.1) в [11]:

$$\Delta W_3 = \int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W_3(r)dr, \quad (4)$$

где $W_3(r)$ – нижняя граница переменного доверительного интервала, полученного для лучших мировых образцов.

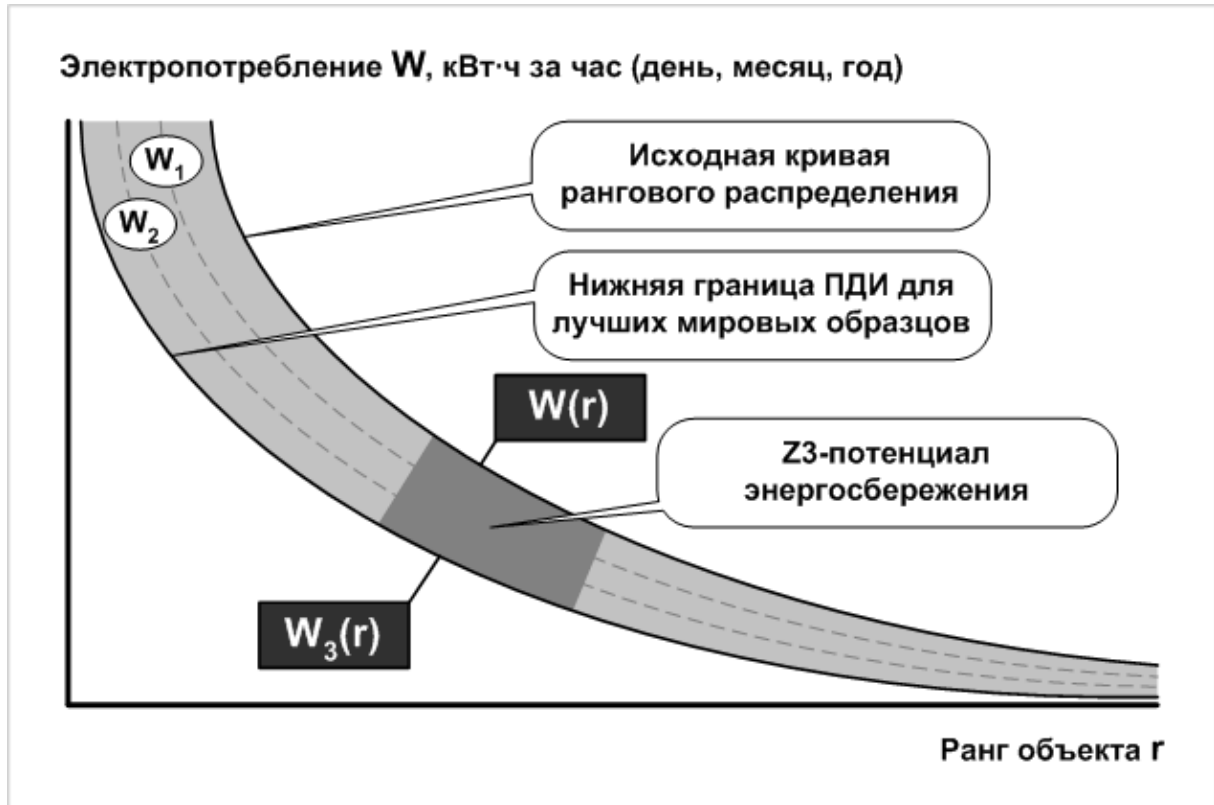


Рис. 3. К понятию Z3-потенциала энергосбережения техноценоза

Таким образом, в данном случае трансформированным является распределение $W_3(r)$, которое получается методами ZP-нормирования. При этом, полагая в каждой функциональной группе в качестве эталонного значение удельного электропотребления, полученного для соответствующих данной группе лучших мировых образцов, мы осуществляем пересчет электропотребления каждого объекта в предположении, что он стал потреблять электроэнергию столь же эффективно, как и объект с лучшими мировыми образцами. Если предположить, что графики нагрузок, а также организационно-штатная структура объектов не меняются, то

$$W_{p;j}^{\text{sup}} = \overline{W}_j^{\text{sup}} \cdot L_{p;j}, \quad (5)$$

где $W_{p;j}^{\text{sup}}$ – расчетное электропотребление p-го объекта в j-ой группе после операции ZP-нормирования;

- $\overline{W}_j^{\text{sup}}$ – эталонное удельное электропотребление для j -ой группы объектов, полученное с учетом показателей энергоэффективности лучших мировых образцов;
- $L_{p;j}$ – лидинговый параметр p -го объекта в j -ой группе.

Из полученных расчетных значений электропотребления объектов техноценоза для каждого временного интервала формируется трансформированный вектор рангового параметрического распределения:

$$\{(W_1^{\text{sup}}, r_1 = 1); (W_2^{\text{sup}}, r_2 = 2); (W_3^{\text{sup}}, r_3 = 3); \dots; (W_k^{\text{sup}}, r_k); \dots; (W_n^{\text{sup}}, r_n)\}, \quad (6)$$

- где W_k^{sup} – расчетное электропотребление объекта k -го ранга;
- r_k – k -ый параметрический ранг техноценоза.

После получения ранговых параметрических распределений по пересчитанным значениям электропотребления для каждого исследуемого временного интервала осуществляется их аппроксимация и построение переменного доверительного интервала. Нижняя граница полученного переменного доверительного интервала позволяет по выражению (4) рассчитать $Z3$ -потенциал энергосбережения техноценоза на расчетный текущий временной интервал (рис. 3). Очевидно, что нижняя граница переменного доверительного интервала, построенного по трансформированному ранговому распределению, будет располагаться ниже, чем соответствующая граница, построенная по эмпирическим данным. Следовательно, $Z3$ -потенциал энергосбережения будет больше, чем $Z1$ - и $Z2$ -потенциалы, что позволяет построить уже трехэтапную методику снижения электропотребления объектов техноценоза. Первый этап будет предполагать реализацию управленческих процедур, нацеленных на снижение электропотребления исключительно за счет организационных мероприятий. После исчерпания $Z1$ -потенциала, на втором этапе должны включаться новые резервы энергосбережения, связанные с модернизацией электрооборудования, осуществляемого за счет уже имеющихся в техноценозе технических решений, обладающих лучшими показателями энергоэффективности. Далее, на третьем этапе в ходе более глубокой модернизации предполагается использование лучших мировых образцов энергоэффективности. Планомерная реализация управленческих процедур позволит существенно понизить электропотребление техноценоза в пределах $Z3$ -потенциала. При этом, учитывая то, что управленческие процедуры реализуются в рамках переменного доверительного интервала, существует гарантия, что снижение электропотребления ни на каком из этапов не нарушит нормальный технологический процесс функционирования объектов техноценоза.

Положительный эффект от внедрения методологии оптимального управления электропотреблением с учетом Z3-потенциала может быть оценен интегральным показателем, полученным на основе (5.16) из [11]:

$$\begin{cases} IP_W^{Z3} = \left(\int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W_3(r)dr \right) / \int_0^{\infty} W(r)dr; \\ IP_W^t = \left(\int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W_t(r)dr \right) / \int_0^{\infty} W(r)dr, \end{cases} \quad (7)$$

- где
- IP_W^{Z3} – целевой интегральный показатель, определяемый на основе Z3-потенциала энергосбережения;
 - IP_W^t – текущий интегральный показатель качества, определяемый на t-ом временном интервале;
 - $W(r)$ – исходная аппроксимационная кривая, получаемая для текущих значений электропотребления объектов;
 - $W_3(r)$ – нижняя граница переменного доверительного интервала, получаемого с помощью понятия Z3-потенциала;
 - $W_t(r)$ – аппроксимационная кривая, получаемая для текущих модельных значений электропотребления объектов техноценоза на t-ом временном интервале.

Как отмечалось выше, в ряде случаев для реализации процедур управления электропотреблением требуется определение добавочного ресурса по электропотреблению. Очевидно, что в данном случае он в точности равен Z3-потенциалу энергосбережения (см. выражение (4)):

$$W_{AD}^{Z3} = \Delta W_3 = \int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W_3(r)dr, \quad (8)$$

- где W_{AD}^{Z3} – добавочный ресурс, рассчитываемый при потенцировании на основе понятия Z3-потенциала.

Второе направление использования трансформированных ранговых параметрических распределений и, соответственно, второй способ определения добавочного ресурса по электропотреблению связаны с процедурой потенцирования с учетом номенклатурных ограничений. В процессе управления электропотреблением на этапе потенцирования, как правило, требуется учитывать так называемые номенклатурные ограничения, возникающие при совместной реализации в едином алгоритме процедур номенклатурной и параметрической оптимизации (рис. 4).

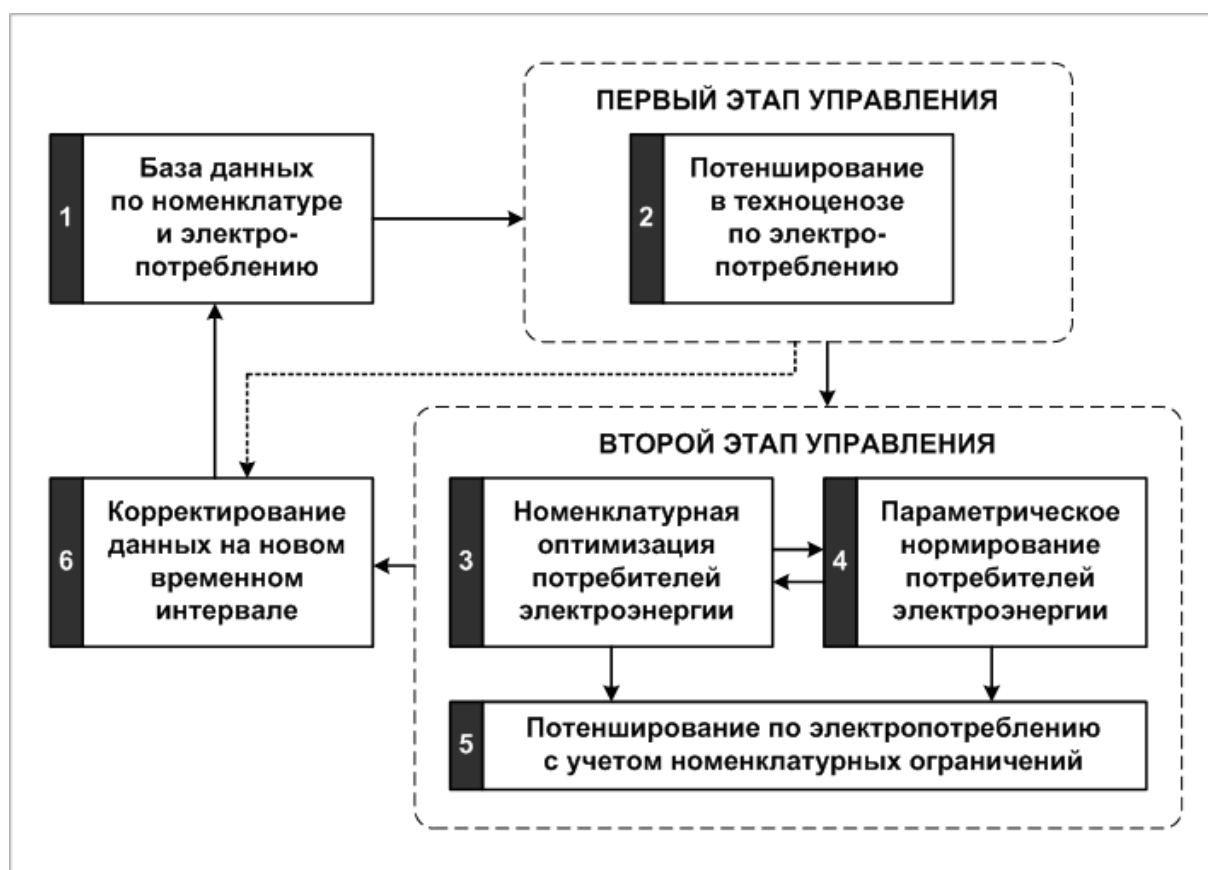


Рис. 4. Единый алгоритм управления электропотреблением

Как показано в п. 3.2 в [11], любое совершенствование структуры (ТЦ-оптимизацию) техноценозов следует осуществлять в два взаимосвязанных этапа. Это в полной мере относится и к управлению электропотреблением. На первом этапе необходимо оптимизировать техноценоз по электропотреблению, т.е. уменьшить потребление электроэнергии без изменения структуры. Данный этап проводится методами потенширования с использованием $Z1$ -потенциала энергосбережения циклично на протяжении ряда временных интервалов до тех пор, пока не будут исчерпаны организационные меры. То, что на данном этапе не затрагивается номенклатура техноценоза, определяет сравнительно небольшие затраты на осуществление процедур. Как известно методология управления электропотреблением включает еще три взаимосвязанных этапа-процедуры: интервальное оценивание, прогнозирование и нормирование (рис. 1 и 5), однако именно потенширование является завершающей процедурой, т.к. позволяет выполнить оптимизацию, оценить эффективность процесса управления и сформировать параметры обратных связей (см. гл. 5 в [11]).

Когда будет исчерпан $Z1$ -потенциал энергосбережения, на втором этапе общего алгоритма (рис. 4) приступают к ZP -нормированию, которое предполагает структурные преобразования в номенклатуре техноценоза, (номенклатурную оптимизацию). Момент перехода от первого ко второму

этапу определяется по результатам стержневой процедуры первого этапа – интервальному оцениванию (рис. 1 и 5). После того, как в результате многократной цикличной реализации четырех процедур управления по электропотреблению обнаружится, что в эмпирическом ранговом параметрическом распределении техноценоза отсутствуют «аномальные» точки, выходящие за границы переменного доверительного интервала, первый этап следует заканчивать. Очевидно, что именно к этому моменту будет исчерпан Z1-потенциал энергосбережения техноценоза.

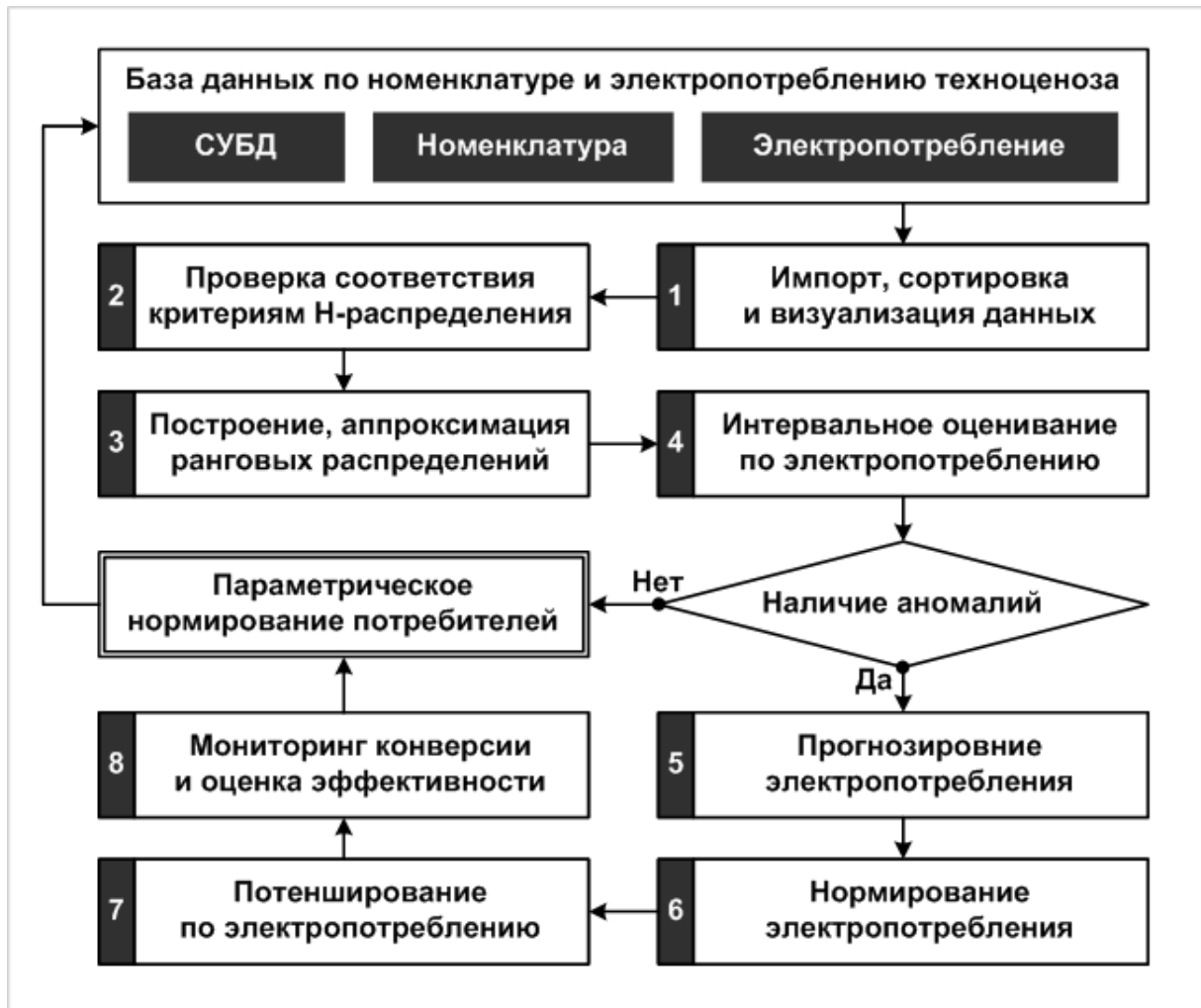


Рис. 5. Потенсирование и параметрическое нормирование в техноценозе

Основное содержание второго этапа потенсирования составляют процедуры ZP-нормирования, ZP-планирования, оценки эффективности и мониторинга конверсии, которые позволяют постепенно без технологических ограничений исчерпать Z2-потенциал энергосбережения. Однако на данном этапе предполагаются модернизация и перевооружение, что неотвратимо вызывает номенклатурные изменения. Для минимизации затрат на

всестороннее обеспечение здесь требуется номенклатурная оптимизация техноценоза, которая реализуется преимущественно методами параметрического нормирования (рис. 6). В конечном итоге формируется видовое разнообразие техноценоза, соответствующее каноническому гиперболическому H -распределению [1,11]. Однако управление электропотреблением в это время не заканчивается, т.к. к моменту формального завершения второго этапа от начала всего процесса проходит весьма значительное время. Принципиально важно, что сформулированная концепция включает в себе не замкнутый алгоритм оптимизации итерационного типа, а открытую циклическую стратегию, предполагающую непрерывную и несходящуюся реализацию первого и второго этапов и направляющую (в условиях постоянно изменяющейся инфраструктуры) динамично развивающийся техноценоз к более стабильному (гомеостатическому) состоянию.

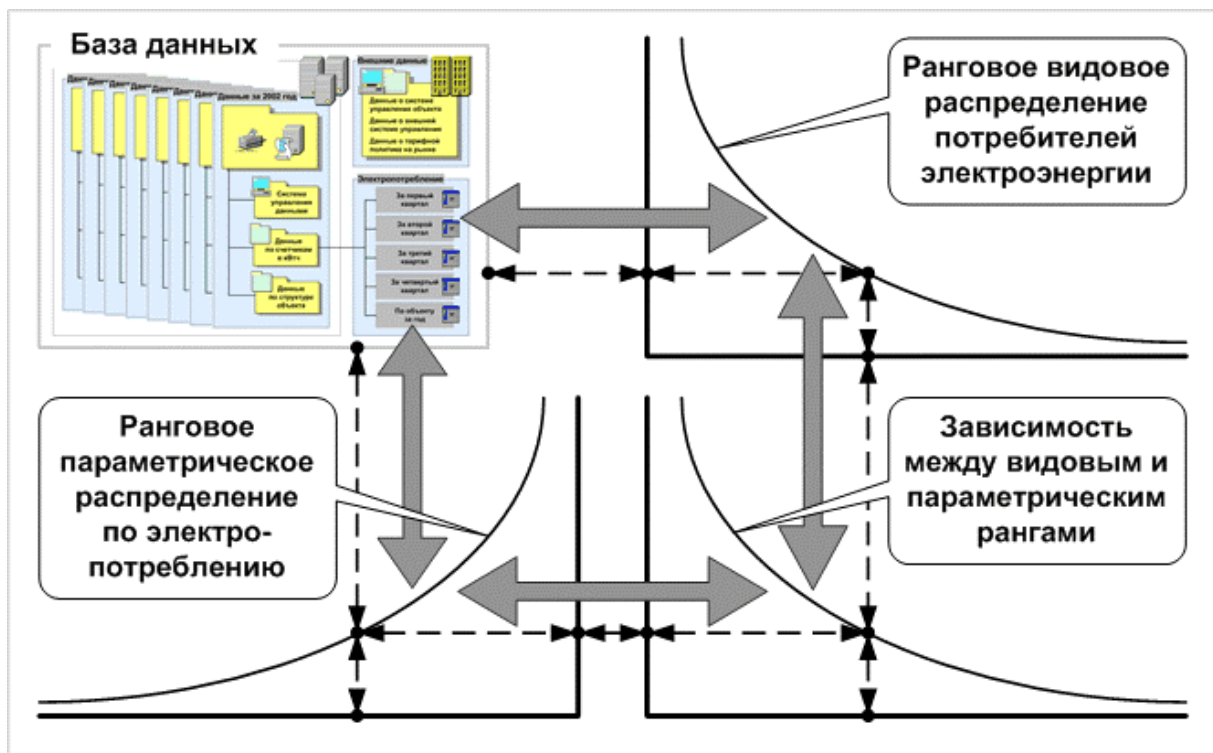


Рис. 6. Параметрическое нормирование в техноценозе

В совместной реализации процедур потенцирования и параметрического нормирования имеется один важный момент. Дело в том, что требования, касающиеся модернизации и перевооружения потребителей электроэнергии, вырабатываемые по итогам процедуры ZP-нормирования, далеко не всегда могут быть реализованы. Отдельные потребители не могут выполнить данные требования по технологическим соображениям, что задает так называемые номенклатурные ограничения к самой процедуре потенцирования, учет которых осуществляется следующим образом. Прежде

всего, реализуется второй этап процедуры потенцирования, так сказать, в «чистом виде» без учета номенклатурных ограничений, что позволяет получить Z2-потенциал энергосбережения и соответствующую нижнюю границу доверительного интервала $W_2(r)$ (рис. 7). Затем на каждом объекте определяется перечень потребителей электроэнергии, которые по тем или иным причинам на данном временном этапе не могут быть подвергнуты модернизации. Далее с использованием процедуры параметрического нормирования по номограммам, аналогичным показанной на рисунке 6, рассчитываются значения электропотребления объектов с учетом номенклатурных ограничений. Это, в свою очередь, позволяет получить трансформированное ранговое параметрическое распределение по электропотреблению $W_{2N}(r)$, которое также показано на рисунке 7.

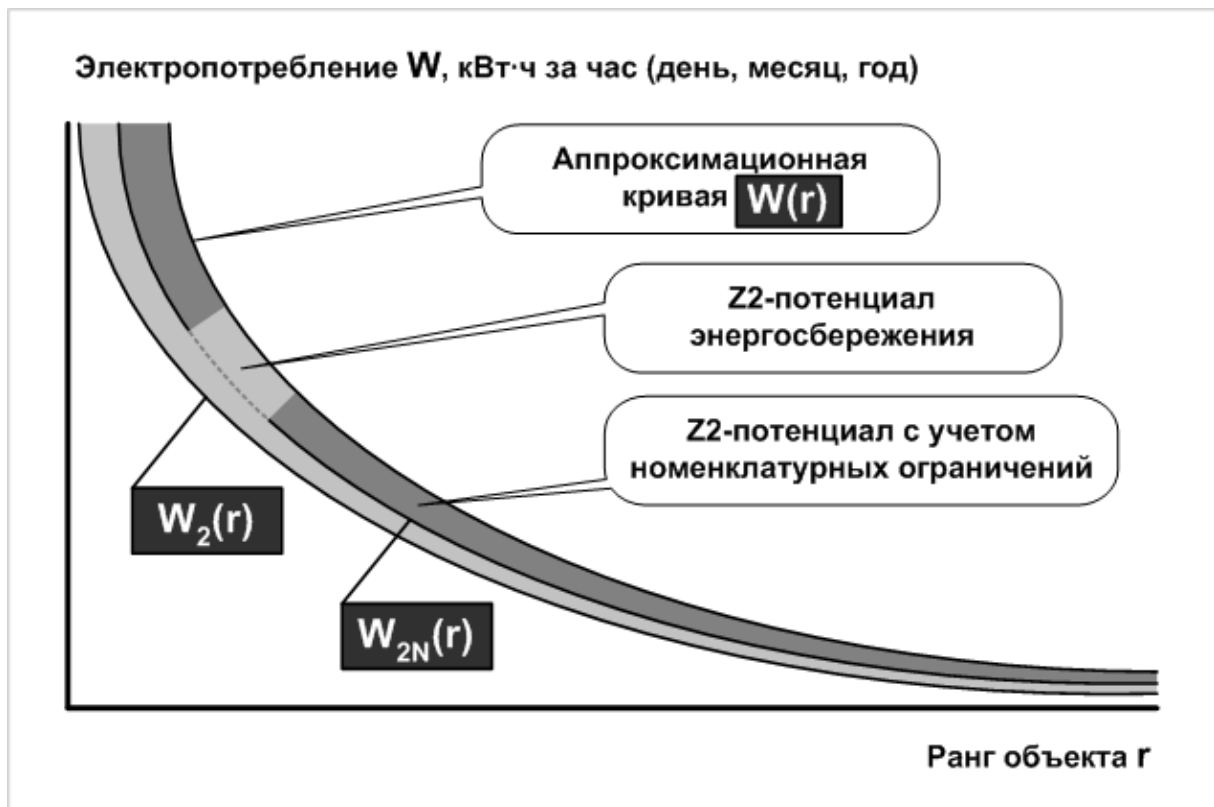


Рис. 7. Потенцирование по электропотреблению с учетом номенклатурных ограничений

Добавочный ресурс по электропотреблению в данном случае рассчитывается как разность потенциалов энергосбережения:

$$W_{AD}^{2N} = \int_0^{\infty} W_{2N}(r) dr - \int_0^{\infty} W_2(r) dr, \quad (9)$$

где W_{AD}^{2N} – добавочный ресурс, рассчитываемый при потенцировании на основе Z2-потенциала энергосбережения и учитывающий номенклатурные ограничения.

Третье направление использования трансформированных распределений предполагает создание методики МС-прогнозирования электропотребления объектов техноценоза («МС» – от «MacroCenosis») [1,11]. МС-прогнозирование – процедура прогнозирования электропотребления объектов техноценоза, предполагающая, с целью уточнения прогноза, использование статистической информации об электропотреблении техноценоза в целом как точки на ранговой параметрической поверхности, построенной для макроценоза. Под макроценозом (МС-ценозом) понимается «материнская» взаимосвязанная совокупность техноценозов более высокого системного уровня, обладающая техноценологическими свойствами, в состав которой входит исследуемый техноценоз как единичный организационно подчиненный «дочерний» объект (МС-объект) (рис. 8).

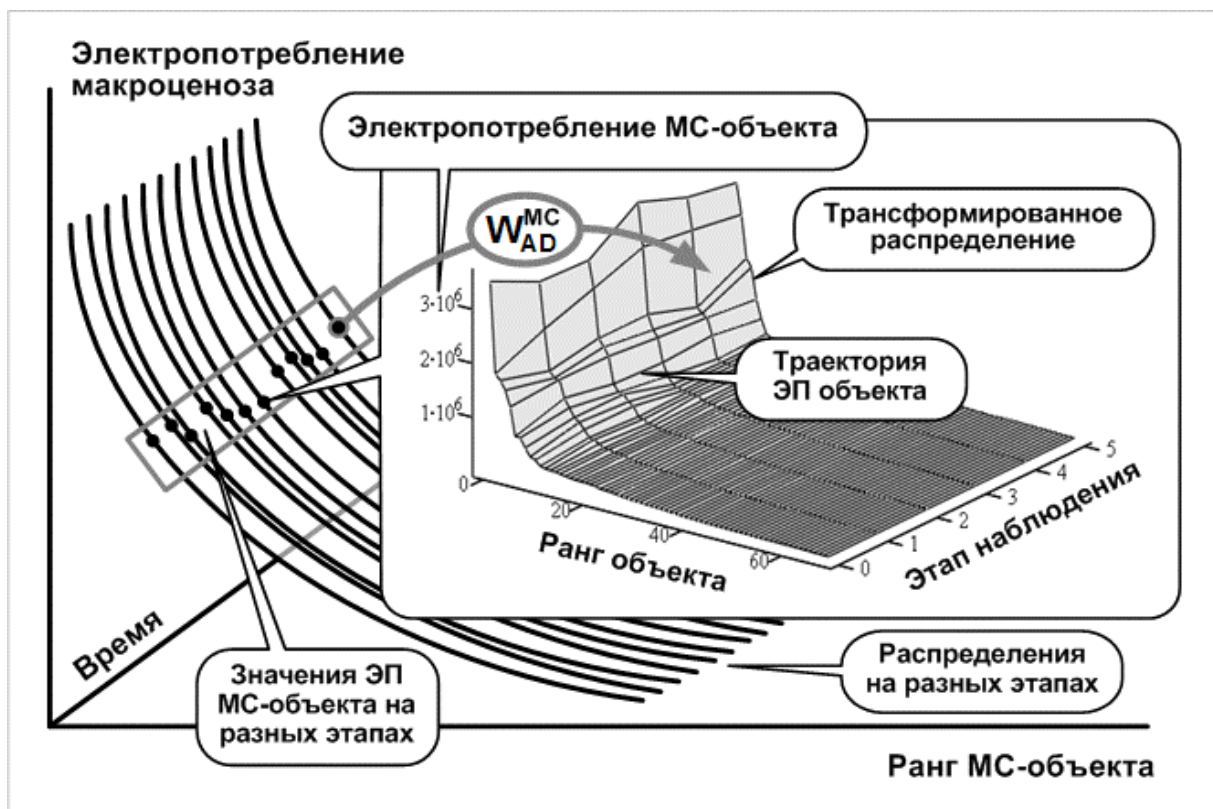


Рис. 8. К понятию МС-прогнозирования

Прогнозная (в широком смысле – модельная) информация об электропотреблении МС-объекта фактически позволяет с помощью понятия добавочного ресурса получить бифуркационное ранговое параметрическое распределение, когда он рассматривается уже в качестве полноценного

техноценоза. При этом используются расчетные модели (1) или (3). Таким образом, с учетом результатов прогнозирования (моделирования), выполненного существующими методами [1,11] на основе статистики макроценоза, для отдельного МС-объекта в определенный момент времени:

$$W_{AD}^{MC}(\tau) = W_k^{MC}(\tau) - W_k^{MC}(\tau + 1), \quad (10)$$

где $W_{AD}^{MC}(\tau)$ – добавочный ресурс техноценоза (k-го МС-объекта макроценоза) в момент времени τ ;
 $W_k^{MC}(\tau)$ – электропотребление k-го МС-объекта в момент τ ;
 $W_k^{MC}(\tau + 1)$ – электропотребление k-го МС-объекта макроценоза в прогнозируемый момент времени $\tau + 1$.

Четвертый способ решения задачи определения добавочного ресурса связан с режимным нормированием, под которым понимается процедура нормирования электропотребления объектов техноценоза в особых режимах функционирования, характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Режимы определяются внешними ресурсными ограничениями и, как правило, носят временный характер.

Различают следующие режимы функционирования техноценоза: R3-режим частичного ограничения, при котором на всех объектах должны быть принудительно отключены от электроснабжения потребители третьей категории – второстепенные потребители, непосредственно не оказывающие влияния на выполнение объектами основных задач; R2-режим, при котором на всех объектах, помимо потребителей третьей категории, должны быть принудительно отключены от электроснабжения потребители второй категории – потребители, отключение которых не оказывает влияния на выполнение объектами основных задач в течение определенного промежутка времени; R1-режим, при котором на всех объектах, помимо потребителей второй и третьей категорий, должны быть принудительно отключены от электроснабжения потребители первой категории – потребители, определяющие выполнение объектами основных задач [1,11].

R3-режим не ограничен по времени (в рамках общего периода ресурсных ограничений) и не приводит к снижению основной функциональности. R2-режим приводит к частичному снижению функциональности и должен быть ограничен промежутком времени, в течение которого допустимо заданное снижение функциональности и происходит восстановление R3-режима. R1-режим приводит к существенному снижению функциональности и должен быть ограничен предельно коротким промежутком времени, в течение которого должно осуществляться бесперебойное электроснабжение особой группы потребителей первой категории и восстановление R2-режима (с последующим восстановлением R3-режима).

Целью режимного нормирования является формирование плана ресурсных ограничений каждого из объектов техноценоза во всех режимах. Исследования здесь производятся с помощью аппарата R-распределений техноценоза, под которыми понимаются ранговые параметрические распределения техноценоза по электропотреблению, построенные для условий особых режимов функционирования (R-режимов), характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Различают следующие основные виды R-распределений: R3-распределение, которое строится для условий R3-режима, R2-распределение – для R2-режима и R1-распределение – для R1-режима [1,11] (рис. 9).

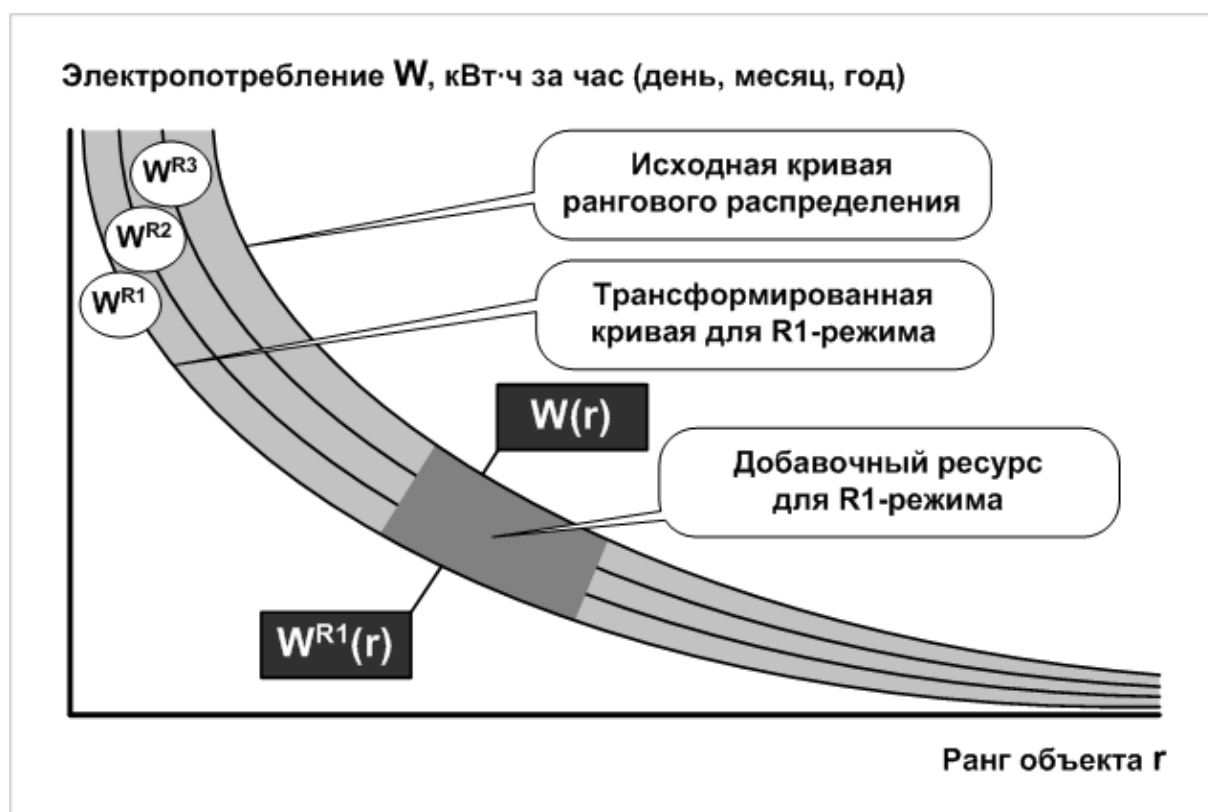


Рис. 9. R-распределения техноценоза

С целью расчета добавочного ресурса для каждого режима функционирования, исходя из анализа графиков плановых отключений потребителей электроэнергии, определяется результирующее расчетное электропотребление каждого объекта техноценоза. Из полученных расчетных значений для каждого временного интервала формируется трансформированный вектор рангового параметрического распределения (R-распределение). Например, для условий R1-режима можно записать:

$$\{(W_1^{R1}, r_1 = 1); (W_2^{R1}, r_2 = 2); (W_3^{R1}, r_3 = 3); \dots; (W_k^{R1}, r_k); \dots; (W_{n1}^{R1}, r_{n1})\}, \quad (11)$$

- где W_k^{R1} – расчетное электропотребление объекта k-го ранга в условиях R1-режима;
 r_k – k-ый параметрический ранг техноценоза;
 $n1$ – общее количество объектов, продолжающих функционировать в условиях R1-режима.

После получения ранговых параметрических распределений по пересчитанным значениям электропотребления для каждого исследуемого временного интервала осуществляется их аппроксимация (рис. 9). Добавочный ресурс определяется как площадь полосы, заключенной между исходной не трансформированной кривой рангового параметрического распределения техноценоза и соответствующей кривой R-распределения. В частности, на рисунке 9 показан добавочный ресурс для R1-режима, который аналитически можно записать следующим образом:

$$W_{AD}^{R1} = \int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^{R1}(r)dr, \quad (12)$$

- где W_{AD}^{R1} – добавочный ресурс, рассчитанный для R1-режима;
 $W(r)$ – исходная не трансформированная кривая рангового параметрического распределения техноценоза;
 $W^{R1}(r)$ – кривая R-распределения, полученная по результатам трансформации применительно к R1-режиму.

Пятый способ решения задачи определения добавочного ресурса осуществляется с помощью так называемого DC-анализа («DC» – от «DominantCenosis») [1,11]. DC-анализ – процедура рангового анализа по электропотреблению объектов техноценоза, предполагающая, с целью уточнения, использование статистической информации об электропотреблении доминирующего, иерархически более старшего, технологически определяющего техноценоза. Под доминирующим техноценозом (DC-ценозом) понимается технологически определяющая поведение зависимого техноценоза взаимосвязанная совокупность объектов, обладающая техноценологическими свойствами. При этом объекты исследуемого техноценоза (в данном случае – зависимого), как правило, жестко связаны с соответствующими объектами доминирующего DC-ценоза. Тип данных связей определяется технологическими особенностями функционирования (например, электроснабжение в пределах одной энергосистемы).

Характерным примером DC-ценоза выступает региональный электроэнергетический комплекс (доминирующий техноценоз), питающий своими объектами (системообразующими подстанциями) соответствующими

щие объекты регионального электротехнического комплекса (зависимого техноценоза) (рис. 10). Дадим определение. Под региональным электроэнергетическим комплексом понимается ограниченная в пространстве и времени обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность источников и потребителей электроэнергии, а также транспортно-сетевое хозяйство и системы материально-технического обеспечения, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения в комплексе с внешней энергосистемой или изолированно цель устойчивого электроснабжения потребителей региона [1,11].



Рис. 10. Региональные электроэнергетический и электротехнический комплексы

Следует отметить, что понятие объекта в данном случае трактуется несколько специфически. Предполагается, что имеется договорная точка раздела на границе между энергокомпанией и абонентом, с каждой из сторон которой установлены приборы учета электроэнергии. С одной стороны фиксируется электропотребление объектов доминирующего техноценоза, а с другой – зависимого. Очевидно, что от одного объекта доминирующего техноценоза могут питаться один или несколько объектов зависимого.

Суть процедуры DC-анализа схематично показана на рисунке 11. В данном случае предполагается, что исходные ранговые параметрические распределения по электропотреблению зависимого и доминирующего техноценозов совпадают (кривая $W(r)$ на рис. 11). Это представляется справедливым с учетом технологической неразрывности процесса производства, передачи и потребления электроэнергии (что, в свою очередь, следует из известного принципа непрерывности электрического тока).

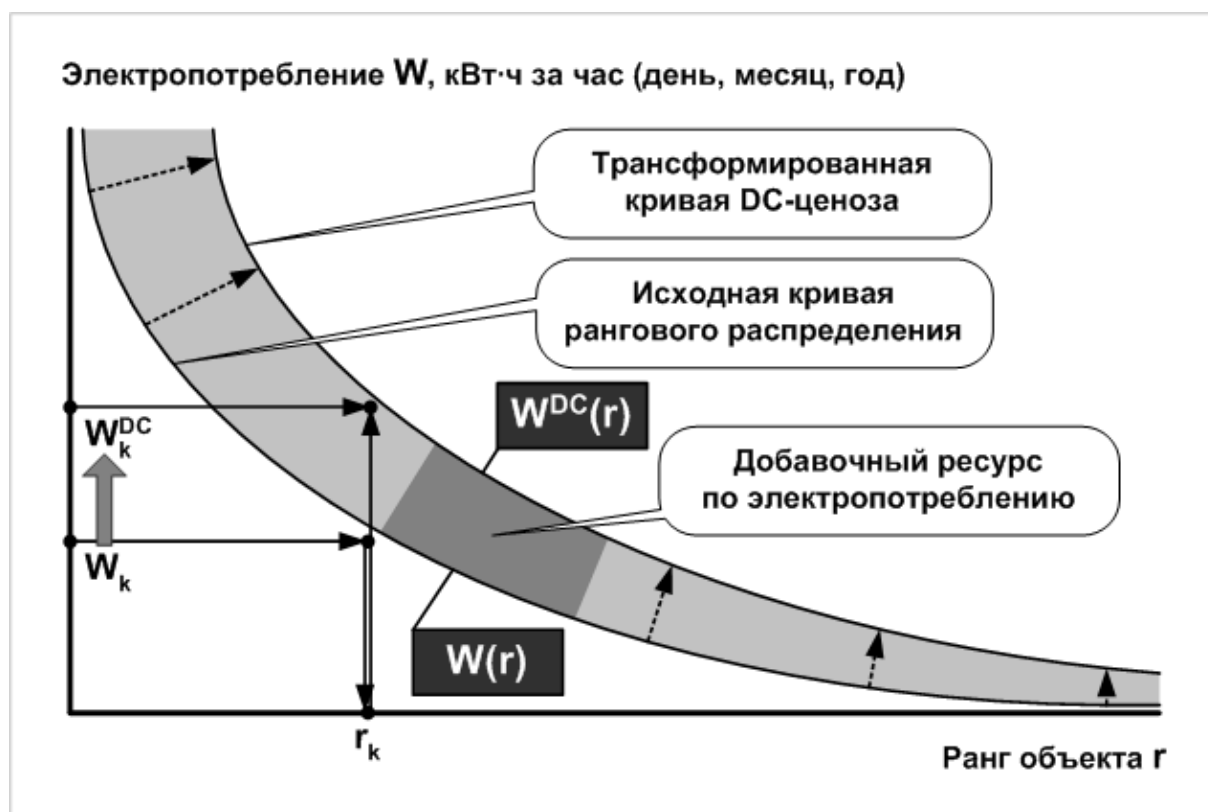


Рис. 11. Суть процедуры DC-анализа

Пересчет значений электропотребления объектов доминирующего техноценоза осуществляется методами моделирования исходя из имеющейся информации о планах и программах развития. Из полученных расчетных значений на каждом временном интервале для каждого из общего количества n объектов формируется трансформированный вектор рангового параметрического распределения по электропотреблению $W^{DC}(r)$:

$$\{(W_1^{DC}, r_1 = 1); (W_2^{DC}, r_2 = 2); (W_3^{DC}, r_3 = 3); \dots; (W_k^{DC}, r_k); \dots; (W_n^{DC}, r_n)\}, \quad (13)$$

где W_k^{DC} – полученное методами моделирования значение электропотребления k -го объекта DC-ценоза.

После получения ранговых параметрических распределений по пересчитанным значениям электропотребления для каждого исследуемого временного интервала осуществляется их аппроксимация (рис. 11). На рисунке стрелками показано изменение значения электропотребления k -го объекта DC-ценоза. Для простоты здесь предполагается, что ранг этого объекта после трансформации распределения не изменился. В общем случае ранги объектов могут поменяться, однако, в любом случае, это не помешает осуществить аппроксимацию и получить трансформированное ранговое параметрическое распределение DC-ценоза. Очевидно, что конечные (после трансформации) ранговые параметрические распределения по электропотреблению зависимого и доминирующего техноценозов, как и исходные, совпадают (кривая $W^{DC}(r)$ на рис. 11). Это позволит, кроме прочего, зафиксировать положение объектов зависимого техноценоза на едином конечном ранговом параметрическом распределении и оценить их электропотребление. Учитывая, что, как правило, ранги объектов доминирующего и зависимого техноценозов не совпадают, для фиксации объектов здесь должны быть применены методы ранговой динамики [1,11].

Добавочный ресурс по данной процедуре определяется как площадь полосы, заключенной между исходной не трансформированной кривой $W(r)$ и трансформированной кривой $W^{DC}(r)$ (см. рис. 11):

$$W_{AD}^{DC} = \int_0^{\infty} W^{DC}(r)dr - \int_0^{\infty} W(r)dr, \quad (14)$$

где W_{AD}^{DC} – рассчитанный в результате DC-анализа добавочный ресурс техноценоза по электропотреблению.

В итоге результирующий добавочный ресурс техноценоза по электропотреблению определяется как сумма добавочных ресурсов, полученных во всех пяти процедурах (см. выражения (8), (9), (10), (12) и (14)):

$$W_{AD} = W_{AD}^{Z3} + W_{AD}^{2N} + W_{AD}^{MC} + W_{AD}^{R1} + W_{AD}^{DC}. \quad (15)$$

Как показывают моделирование и уже неоднократная практическая реализация [1-13], внедрение в техноценозах методологии оптимального управления электропотреблением с применением трансформированных ранговых параметрических распределений позволяет существенно уточнить процедуры интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования по электропотреблению, а также соответствующие тонкие дополнения дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализа.

Литература

1. Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – М.: [б.и.], [2000]. – Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].
2. Гнатюк В.И. Моделирование и оптимизация в электроснабжении войск: Монография. – Вып. 4. Ценологические исследования. – М.: Центр системных исследований, 1997. – 216 с.
3. Гнатюк В.И. Оптимальное построение техноценозов. Теория и практика: Монография. – Вып. 9. Ценологические исследования. – М.: Центр системных исследований, 1999. – 272 с.
4. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: Монография. – Вып. 29. Ценологические исследования. – М.: Изд-во ТГУ – Центр системных исследований, 2005. – 384 с.
5. Гнатюк В.И., Шейнин А.А. и др. Нормирование электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса с использованием предельного алгоритма. – Калининград: КПИ, 2012. – 289 с.
6. Гнатюк В.И., Шейнин А.А. Нормирование электропотребления регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. – М.: ИНП РАН, 2012. – 102 с.
7. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Статья] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf>, свободный.
8. Гнатюк В.И., Луценко Д.В. Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. – М.: Изд-во ИНП РАН, 2013. – 107 с.
9. Гнатюк В.И. Потенциал энергосбережения техноценоза [Трактат] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [КИЦ ТЦ], [2013]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf>.
10. Гнатюк В.И. Философские основания техноценологического подхода [Монография] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/mono_pdf/text.pdf, свободный.
11. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / В.И. Гнатюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, свободный.
12. Гнатюк В.И. и др. Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса. – Калининград: КГТУ, 2015. – 106 с.
13. Гнатюк В.И. и др. Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса. – Калининград: КПИ, 2015. – 108 с.