

4.3. Эффективность и потенциал энергосбережения

Как ранее показано автором в работах [19,20], эффективность процесса энергосбережения на объектах техноценоза по результатам моделирования может быть оценена сопоставлением двух ключевых интегральных показателей, один из которых характеризует получаемый кумулятивный положительный эффект, а второй – затраты. Положительный эффект от внедрения методологии оптимального управления электропотреблением оценивается интегральным показателем вида:

$$P_w = \frac{\int_0^{\infty} W_1(r)dr - \int_0^{\infty} W_2(r)dr}{\int_0^{\infty} W_1(r)dr}, \quad (4.36)$$

где $W_1(r)$ – ранговое параметрическое распределение по электропотреблению, построенное в результате имитационного моделирования, при условии отсутствия управляющего воздействия, направленного на энергосбережение;
 $W_2(r)$ – ранговое параметрическое распределение, полученное при наличии управляющего воздействия.

Затраты на внедрение методологии оптимального управления электропотреблением также оцениваются интегральным показателем:

$$P_z = 1 + \frac{\int_0^{\infty} Z_2(r)dr}{\int_0^{\infty} Z_1(r)dr}, \quad (4.37)$$

где $Z_2(r)$ – ранговое параметрическое распределение техноценоза по затратам на внедрение энергосберегающих технологий, построенное по результатам моделирования;
 $Z_1(r)$ – ранговое параметрическое распределение по затратам на оплату за потребленную электроэнергию применительно к варианту без управляющего воздействия.

Очевидно, что критерием эффективности техноценологического типа (ТЦ-критерием) здесь является максимизация интегрального показателя эффективности (подробнее – см. в работе [20]):

$$\mathbb{P} = \frac{\mathbb{P}_w}{\mathbb{P}_z} \xrightarrow{k \in [1, n]} \max, \quad (4.38)$$

при выполнении ГЦ-ограничений:

$$W(r_k) - \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2} \leq w_k \leq W(r_k) + \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2}, \quad (4.39)$$

где

$$\{\Phi(x)\}^{-1} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{x/2} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right\}^{-1} \quad - \text{ функция Лапласа, задающая границы доверительного интервала [1,23];}$$

- n – общее количество объектов в техноценозе;
- w_k – эмпирическое значение электропотребления k -го объекта техноценоза, получаемое по результатам имитационного моделирования;
- $W(r_k)$ – электропотребление, соответствующее рангу k -го объекта на кривой $W(r)$;
- p_δ – априорная 95 %-ная доверительная вероятность;
- $[\sigma_k]$ – эмпирический стандарт распределения $W(r)$ в кластере k -го объекта.

Для реализации гауссового разброса параметров в пределах кластера доверительная вероятность p_δ принимается равной 0,95. Эмпирический стандарт $[\sigma_k]$ рассчитывается по результатам процедур интервального оценивания и кластер-анализа (подробнее – см. в работе [20]).

Анализ показывает, что интегральный показатель \mathbb{P}_w исчисляется в диапазоне $[0,1]$, левая граница которого соответствует полному отсутствию управляющих энергосберегающих процедур, а правая – «абсолютному энергосбережению», сводящему электропотребление к нулю. В свою очередь, интегральный показатель \mathbb{P}_z исчисляется в диапазоне $[1, \infty)$. Левая граница показателя соответствует состоянию с нулевыми затратами на выполнение мероприятий по энергосбережению, правая – бесконечным затратам. Очевидно, что при этом интегральный показатель эффективности \mathbb{P} находится в пределах $[0,1]$, приобретая свое критериальное значение при строгом выполнении равенства: $\mathbb{P} = 1$.

Неравенство (4.39) определяет необходимость реализации процесса электропотребления на всех объектах техноценоза в границах переменного доверительного интервала, определяемого в ходе интервального оценивания. При этом не допускается снижение электропотребления объектов ниже значения, определяющего минимальные технологические потребности, которые задаются нижней границей переменного доверительного интервала. Оба условия (4.39) должны конъюнктивно выполняться на всей области определения рангового параметрического распределения ($k \in [1, n]$).

Моделирование процесса электропотребления техноценоза осуществляется имитационными методами с использованием транзактного способа организации квазипараллелизма [3,4,11,40] (рис. 4.15). Процесс функционирования отдельных систем объектов техноценоза моделируется агрегатным методом (см. прил. 1 в [20]). Оптимизационные процедуры в рамках модели реализуются с использованием градиентных методов многомерной оптимизации и выпуклого анализа. Многомерная оптимизация дополняется эффективными процедурами одномерного поиска, а выпуклому анализу предшествует проверка на чувствительность [11,19,20,40,52].

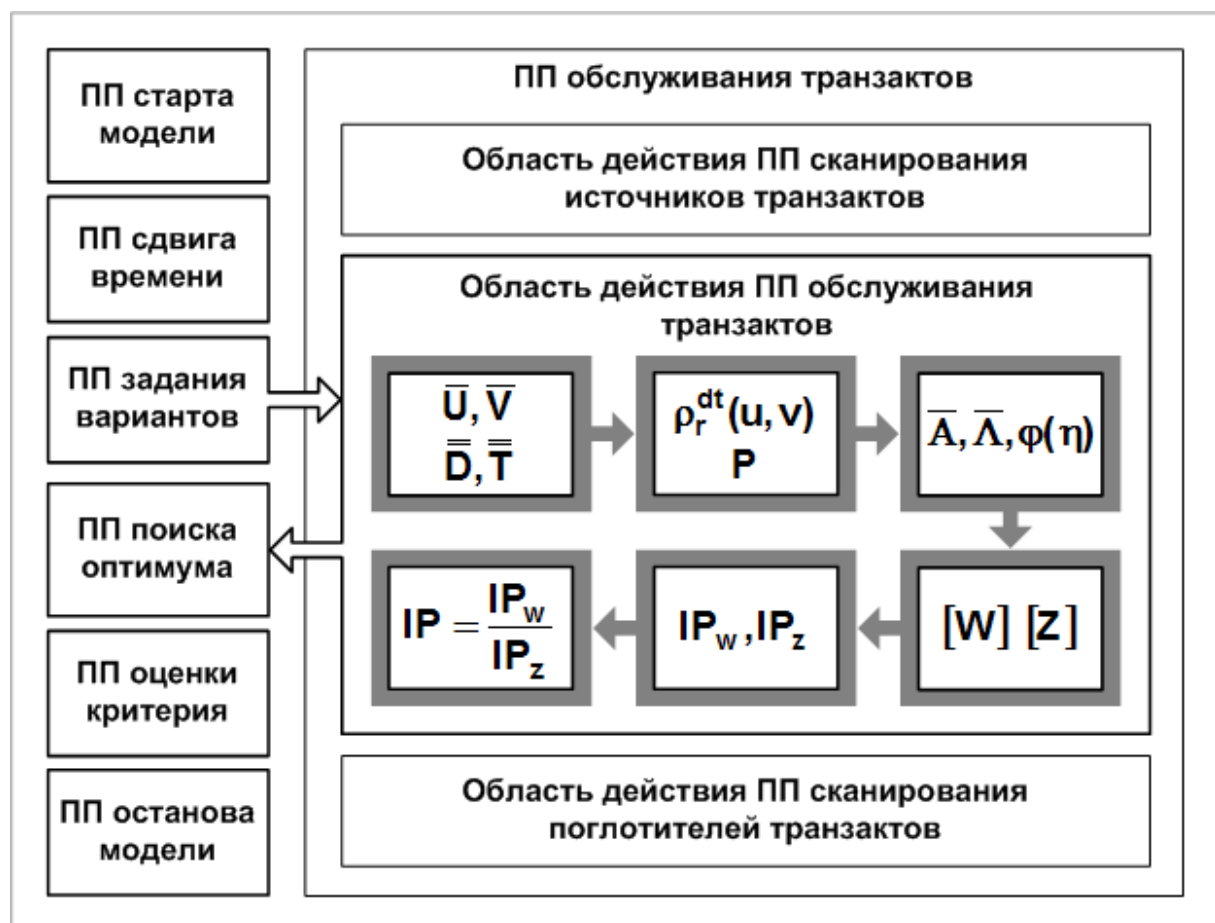


Рис. 4.15. Схема модели процесса электропотребления техноценоза при транзактном способе имитации (ПП – подпрограммы)

Простейшим и в то же время весьма эффективным является метод наискорейшего подъема с использованием одномерного поиска [20,68]. В качестве аналитического ядра целевой функции оптимизации принимается формируемый имитационной моделью интегральный показатель эффективности (4.38) при ограничениях (4.39). Таким образом, целевая функция

$$\phi(s_1, s_2, \dots, s_N) = \mathbb{P}, \quad (4.40)$$

где s_i – i -й оптимизационный параметр варьирования на входе имитационной модели;

N – общее количество параметров варьирования.

При этом циклично осуществляется одномерный поиск в направлении наискорейшего подъема с использованием соотношения [68]:

$$s_i^{\text{new}} = s_i^{\text{old}} + h_i G, \quad (4.41)$$

где s_i^{new} – новое значение i -го оптимизируемого параметра;

s_i^{old} – старое значение i -го оптимизируемого параметра;

h_i – i -й коэффициент в ортогональном разложении градиента целевой функции;

G – одномерный граничный параметр, определяющий скорость оптимизации.

Параметр G нормирует шаги наращивания оптимизируемого параметра в направлении градиента и задается априорно. Соответствующие коэффициенты в ортогональном разложении градиента целевой функции получаются путем численного расчета следующей зависимости:

$$h_i = \frac{\partial\phi/\partial s_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\partial\phi/\partial s_j)^2}}, \quad (4.42)$$

где j – формальный индекс суммирования частных производных целевой функции по параметрам.

Получив одномерный оптимум в направлении данного градиента, находят новый градиент и повторяют процесс до тех пор, пока последующие вычисления позволяют существенно улучшить полученный результат. Достоинство метода состоит в том, что граничный параметр G можно использовать в качестве независимой переменной для поиска по методу

Фибоначчи [68] и это обеспечивает высокую эффективность общего метода. Наиболее существенным недостатком здесь является невозможность определения глобального оптимума в случае мультимодальности гиперпространства отклика, поэтому процедуры наискорейшего подъема дополняются выпуклым анализом [11,19,20,52].

В ходе выпуклого анализа гиперпространства оптимизации $H(L)$ предполагается последовательная проверка выполнения гипергеометрических условий: 1) область определения L является выпуклым множеством; 2) гиперпространство оптимизации H есть вогнутая функция; 3) оболочка гиперпространства $\text{conv}(H)$ не является аффинной. Аналитически данные условия записываются в виде сложной логической системы:

$$\begin{cases} (\theta s_1 + (1 - \theta)s_2) \in L, \exists \forall (s_1, s_2) \in L \wedge \theta \in [0,1]; \\ \phi(\theta s_1 + (1 - \theta)s_2) \geq \theta \phi(s_1) + (1 - \theta)\phi(s_2), \\ \exists \forall (s_1, s_2) \in L \wedge s_1 \neq s_2 \wedge \theta \in [0,1]; \\ (\theta s_1 + (1 - \theta)s_2) \in H, \exists \forall (s_1, s_2) \in H \wedge \theta \in H, \end{cases} \quad (4.43)$$

где θ – элементы числового промежутка;
 s_1 и s_2 – произвольные точки области определения.

Проверка выполнения (4.43) производится с помощью эмпирического анализа канонического уравнения прямой, определяемой рабочими точками, по методике, разработанной и реализованной автором в [11]:

$$\frac{s_1^\xi - s_1^{k-1}}{s_1^k - s_1^{k-1}} = \frac{s_2^\xi - s_2^{k-1}}{s_2^k - s_2^{k-1}} = \dots = \frac{s_N^\xi - s_N^{k-1}}{s_N^k - s_N^{k-1}}, \quad (4.44)$$

где s_i^ξ – координата по i -му параметру варьирования в гиперпространстве оптимизации искомой ξ -ой точки;
 s_i^k и s_i^{k-1} – координаты по i -му параметру варьирования текущей и предыдущей известных точек.

Совместное выполнение трех условий (4.43) позволяет заключить, что в данной области определения возможна эффективная оптимизация с использованием численных методов нулевого порядка (единственно доступных в условиях имитационного моделирования). Если оболочка гиперпространства оптимизации аффинна, то необходимо расширить область определения и повторить анализ. Если область определения не является выпуклым множеством, то необходимо разделить ее на ряд подмножеств и проводить анализ каждого из них в отдельности. Наконец, если гиперпространство не является вогнутой функцией, то оно должно быть рассечено

промежуточной линейной гиперплоскостью с последующим анализом по частям. Более подробно технология данных операций изложена в [11,19, 20,52,62]. Наряду с процедурами выпуклого анализа может также осуществляться анализ модели на чувствительность [11,40].

По результатам моделирования можно определить такой важный параметр, как потенциал энергосбережения техноценоза (рис. 4.16).

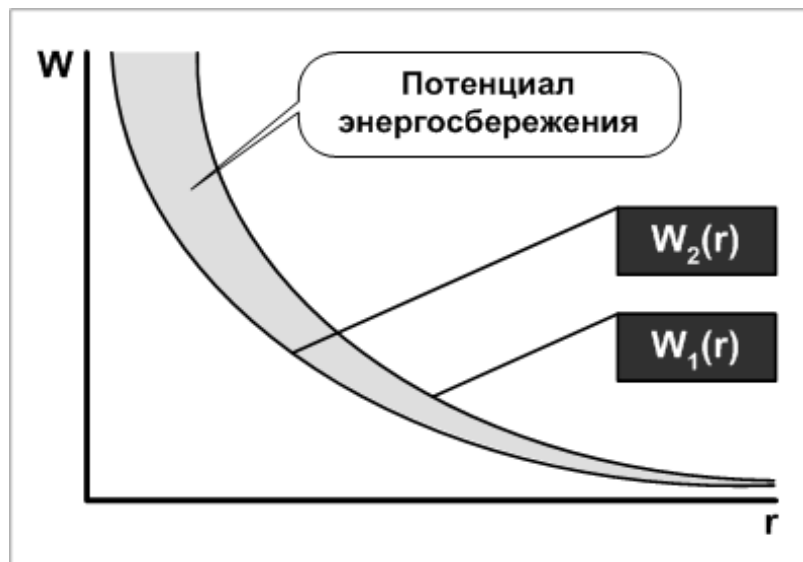


Рис. 4.16. К понятию потенциала энергосбережения

В данном случае под потенциалом энергосбережения понимается полученная в результате моделирования на расчетную глубину времени абсолютная разница (в кВт·ч) между электропотреблением техноценоза без реализации энергосберегающих мероприятий и процедур, с одной стороны, и электропотреблением, полученным в результате внедрения методологии оптимального управления электропотреблением на системном уровне с реализацией комплекса технических и технологических мероприятий, с другой стороны. Следует понимать принципиальную разницу в применении понятия «потенциал энергосбережения» к техноценозу, с одной стороны, и отдельному объекту, с другой [19,20].

Очевидно, что числитель критериального выражения (4.36), вычисленный по результатам оптимизационного процесса, может рассматриваться как потенциал энергосбережения техноценоза:

$$\Delta W_t = \int_0^{\infty} W_1(r) dr - \int_0^{\infty} W_2(r) dr, \quad (4.45)$$

при выполнении ограничений, являющихся следствием закона оптимального построения техноценозов:

$$\begin{cases} \mathbb{P} = \frac{\mathbb{P}_w}{\mathbb{P}_z} \xrightarrow{k \in [1, n]} \max; \\ W(r_k) - \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2} \leq w_k \leq W(r_k) + \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2}, \end{cases} \quad (4.46)$$

где ΔW_t – потенциал энергосбережения объекта (кВт·ч) на глубину времени t .

Реализация разработанной динамической модели электропотребления успешно осуществлена применительно к одному из техноценозов, расположенному на территории Калининградской области и включающему 69 слабосвязанных объектов с годовым электропотреблением от нескольких тысяч до миллионов кВт·ч (на рисунке 4.17 показана упрощенная картограмма нагрузок техноценоза). При этом были использованы статистические материалы и программные продукты, полученные в разные годы научной школой, возглавляемой автором [15-20,48-50].

В работе [20] (см. прил. 2) приведена база данных по электропотреблению исследуемого объекта, а здесь на рисунках 4.18 – 4.22 показаны импортированные непосредственно из программ ключевые графические материалы, иллюстрирующие результаты расчетов. Кроме того, в [20] (см. пп. 5.1 – 5.4) приводится пример реализации методологии в пакете прикладного программного обеспечения Mathcad. Пример состоит из объединенных в три этапа восьми расчетно-графических модулей (РГМ), реализуемых по алгоритму, представленному на рисунке 4.23. При этом этапы методологии выглядят следующим образом:

Этап 1. Первичная обработка статистической информации:

РГМ 1. Импорт, сортировка и визуализация данных.

РГМ 2. Проверка данных на соответствие критериям N -распределения.

РГМ 3. Аппроксимация ранговых распределений.

Этап 2. Построение статической модели электропотребления:

РГМ 4. Интервальное оценивание процесса электропотребления объектами техноценоза.

РГМ 5. Прогнозирование электропотребления в техноценозе:

G-метод прогнозирования;

Z-метод прогнозирования.

РГМ 6. Нормирование электропотребления объектами техноценоза.

Этап 3. Реализация динамической модели электропотребления:

РГМ 7. Оценка потенциала энергосбережения техноценоза.

РГМ 8. Определение первоочередных объектов для углубленного энергетического обследования.

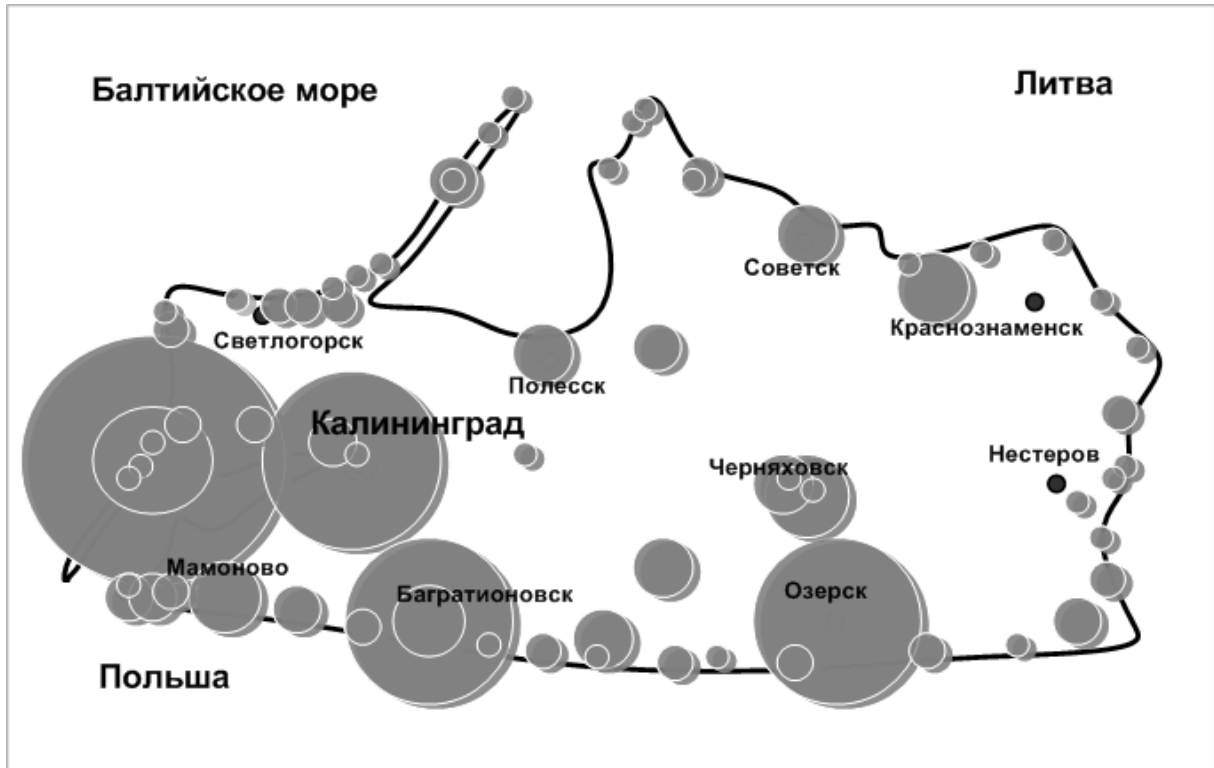


Рис. 4.17. Существующий на территории Калининградской области объект реализации методологии

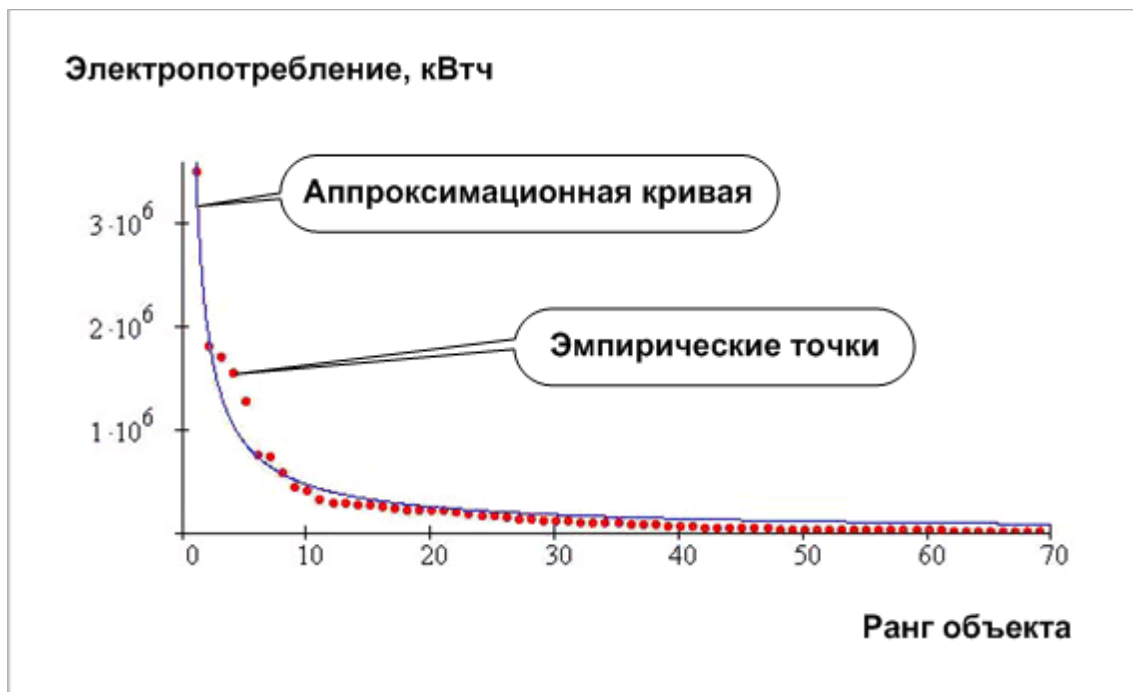


Рис. 4.18. Аппроксимация эмпирических данных по электропотреблению объектов

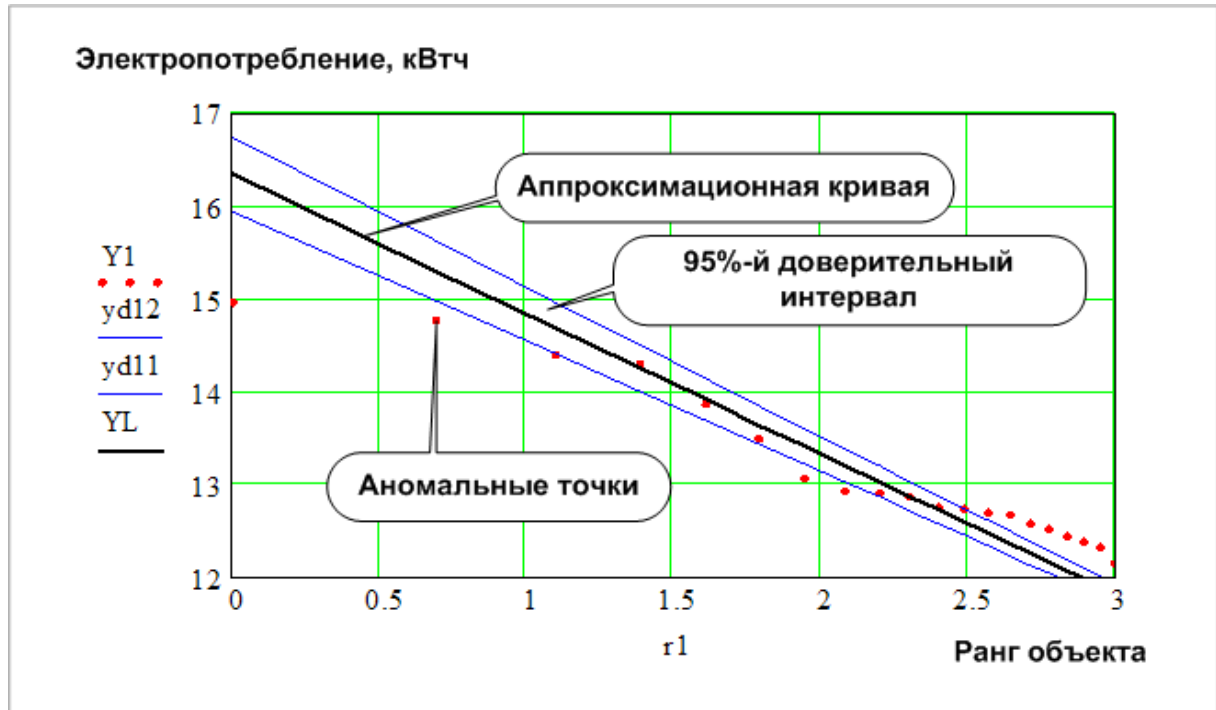


Рис. 4.19. Интервальное оценивание и определение объектов, аномально потребляющих электроэнергию

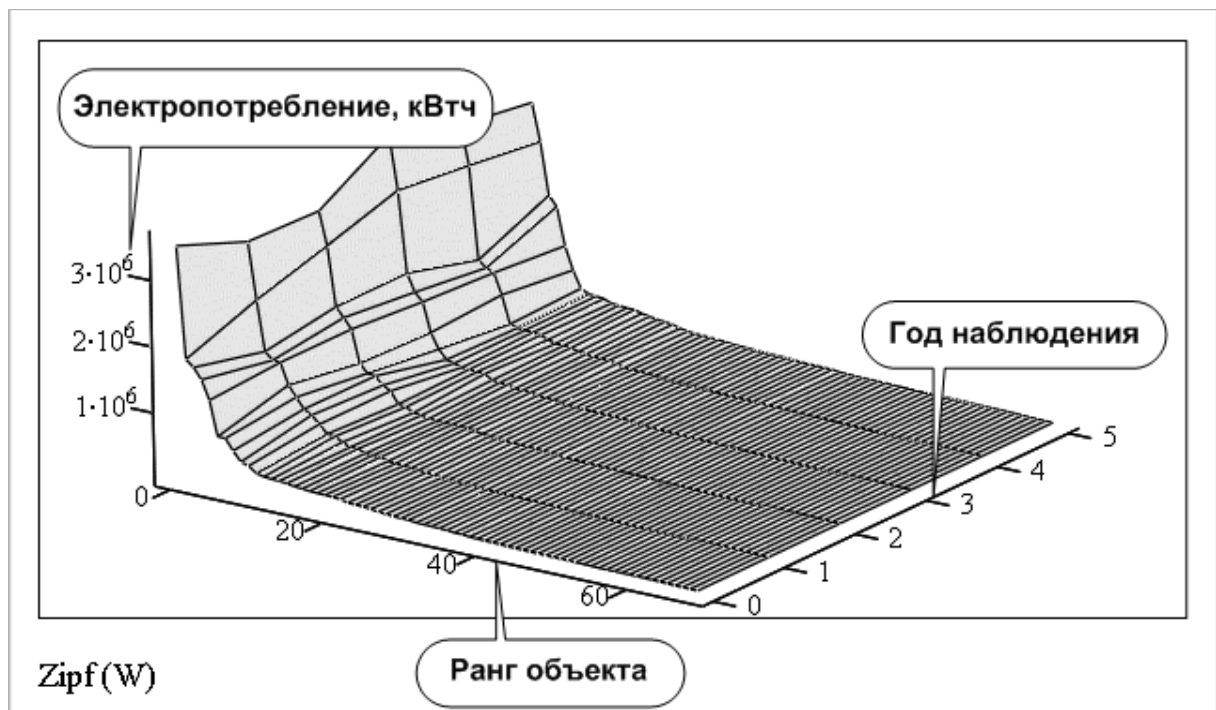


Рис. 4.20. Прогнозирование электропотребления в техноценозе по ранговой поверхности

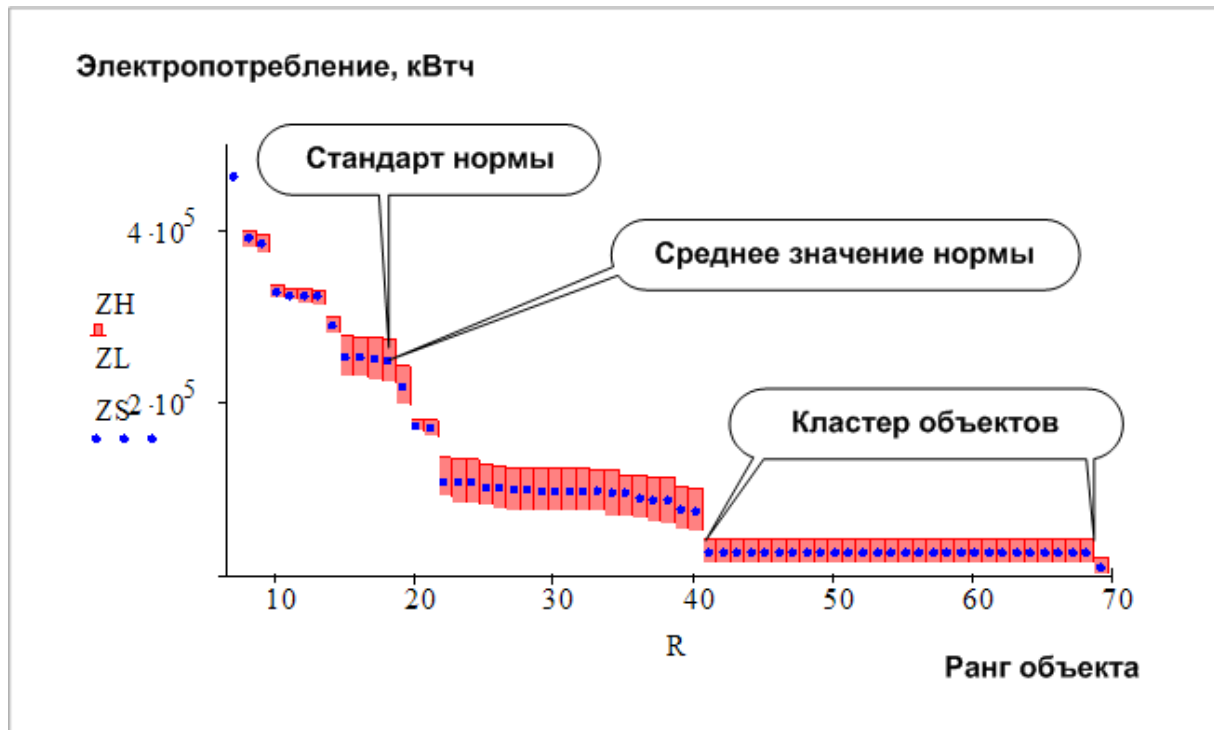


Рис. 4.21. Кластеризация и нормирование электропотребления в исследуемом техноценозе



Рис. 4.22. Результаты реализации динамической модели применительно к техноценозу

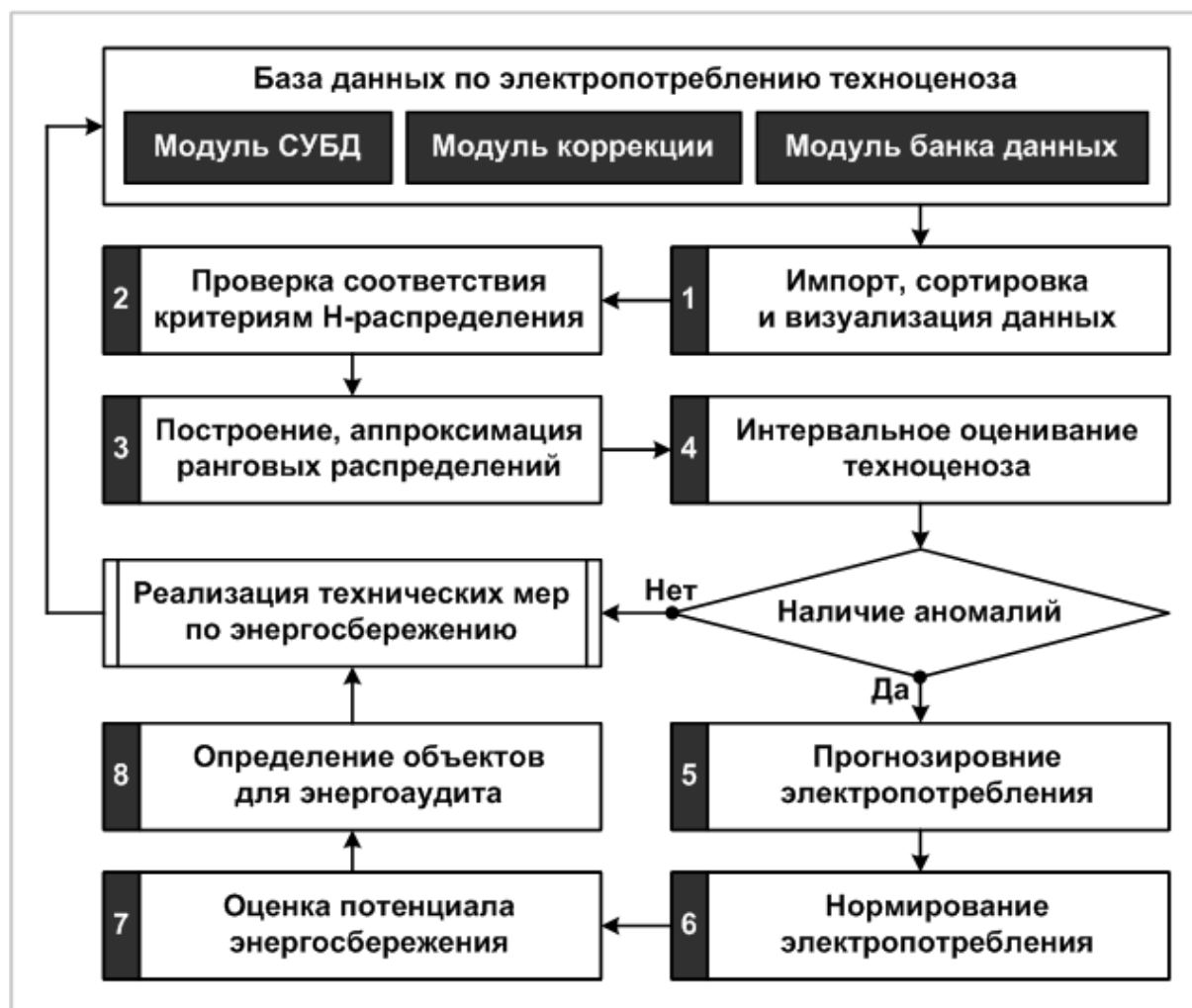


Рис. 4.23. Алгоритм реализации разработанной методологии оптимального управления электропотреблением

Алгоритм реализации методологии оптимального управления электропотреблением техноценоза включает два этапа (рис. 4.23). На первом осуществляется импорт из банка данных, сортировка и визуализация информации. Это выполняется с помощью первого расчетно-графического модуля. После этого данные проверяются на соответствие критериям N -распределения (второй модуль). Далее осуществляется построение и аппроксимация ранговых параметрических распределений (третий модуль). Посредством четвертого модуля производится интервальное оценивание данных с целью выявления «аномальных» объектов. Если таковые не выявлены, то дальше осуществляется реализация технических мер по энергосбережению и корректирование базы данных на новом временном интервале. Если же «аномальные» объекты будут зафиксированы, то в работу на втором этапе алгоритма последовательно включаются пятый – восьмой модули. При этом выполняются процедуры прогнозирования и нормирования электропотребления, а также оценки потенциала энергосбережения

техноценоза и выявления первоочередных объектов для энергоаудита. Далее производится корректирование базы данных, и расчеты повторяются. Реализация алгоритма должна осуществляться непрерывно в замкнутом цикле, составляя, таким образом, часть постоянного мониторинга электропотребления техноценоза (подробнее – см. прил. 2 в [20]).

Как показало моделирование, полное внедрение на объектах техноценоза методологии оптимального управления электропотреблением с учетом ТЦ-критерия (4.25) позволит сэкономить в ближайшие пять лет до 1 млн. долларов за счет организационных и технических мероприятий с быстрым сроком окупаемости (рис. 4.22). Немаловажным резервом является также оптимизация собственно процесса углубленных энергетических обследований (энергоаудита), проводимых на объектах техноценоза после соответствующих процедур интервального оценивания.

Таким образом, оптимизация электропотребления на системном уровне осуществляется в рамках связанной методики в четыре этапа. На этапе статистического анализа и построения эмпирической модели процесса электропотребления осуществляется обработка данных по электропотреблению, которая включает интервальное оценивание, а также ранговый и кластерный анализ. Интервальное оценивание выявляет в динамике и наглядно представляет объекты с аномальным электропотреблением, ранговый анализ позволяет упорядочить информацию, осуществить прогнозирование электропотребления отдельными объектами и техноценозом в целом. Кластерный анализ позволяет разбить объекты по группам и осуществить нормирование электропотребления объектов в каждой группе с подробным статистическим описанием норм.

Статическая модель электропотребления, стержнем которой является детерминированная обработка данных посредством процедур рангового и кластерного анализа, дополняется динамической адаптивной моделью, отражающей процесс электропотребления объектов техноценоза на глубину в будущем 5 – 7 лет и более. При этом ключевым является наличие обратной связи, корректирующей исходную базу данных по электропотреблению на основе результатов текущего моделирования. Динамический характер модели придает развитая система входных параметров, отражающих свойства и внешние условия функционирования объектов техноценоза, а также стохастический аналитический аппарат, основанный на имитационных принципах моделирования и оптимизации.

Результаты практической реализации и моделирования показывают, что даже в условиях средних (с точки зрения установленной мощности) техноценозов возможна экономия миллионов долларов в течение ближайших нескольких лет исключительно за счет внедрения методологии оптимального управления электропотреблением без существенных капитальных вложений. Параллельное внедрение технических решений и энерго-сберегающих технологий еще больше увеличивает экономию.