

5.3. Эффективность управления электропотреблением

Как известно, под эффективностью вообще понимается свойство неживой, биологической или технической системы функционировать с оптимальным (в соответствии с избранным критерием) соотношением интегральных показателей, характеризующих положительный эффект и затраты [58]. В эффективном техноценозе реализуется принцип получения максимального положительного эффекта от функционирования при минимальных затратах на обеспечение данного процесса («минимакс») [108].

Итак, эффективность процесса управления электропотреблением на объектах техноценоза может быть оценена по результатам реализации ZP-анализа 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 [83,86,108]:

$$\left\{ \begin{array}{l} IP_W^* = \left(\int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^*(r)dr \right) / \int_0^{\infty} W(r)dr ; \\ IP_W^t = \left(\int_0^{\infty} W(r)dr - \int_0^{\infty} W^t(r)dr \right) / \int_0^{\infty} W(r)dr , \end{array} \right. \quad (5.16)$$

- 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 переменного доверительного интервала, получаемого 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.

Результирующий интегральный показатель, отражающий степень близости полученной в результате моделирования текущей аппроксимационной кривой рангового параметрического распределения по электропотреблению к нижней границе переменного доверительного интервала (ограничивающей Z1- или Z2-потенциал), определяется как отношение интегрального показателя качества, рассчитанного для текущего момента времени, к показателю, соответствующему нижней границе [83,86,108]:

$$IP_W = \frac{IP_W^t}{IP_W^*} = \frac{\int_0^\infty W(r)dr - \int_0^\infty W^t(r)dr}{\int_0^\infty W(r)dr - \int_0^\infty W^*(r)dr}. \quad (5.17)$$

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 [83,86,106,108]:

$$IP_C = 1 + \frac{\int_0^\infty C^t(r)dr}{\int_0^\infty (W(r) \cdot sc(r))dr - \int_0^\infty (W^*(r) \cdot sc^*(r))dr}, \quad (5.18)$$

- где $C^t(r)$ – ранговое параметрическое распределение объектов техноценоза по совокупным затратам на энергосбережение 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 (5.18) вместо распределений окажутся константы.

Критерием эффективности процесса оптимального управления электропотреблением объектов техноценоза является максимизация интегрального показателя эффективности [83,86,106,108]:

$$IP = \frac{IP_W}{IP_C} \rightarrow \max. \quad (5.19)$$

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 $IP = 1$.

Оптимальное управление процессом электропотребления техноценоза может осуществляться исключительно в границах переменного доверительного интервала (в настоящее время мы его определяем как область 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 переменного доверительного интервала (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 электропотребления на нижней границе переменного доверительного интервала (области допустимых значений) (рис. 5.9) [83,86,106,108].

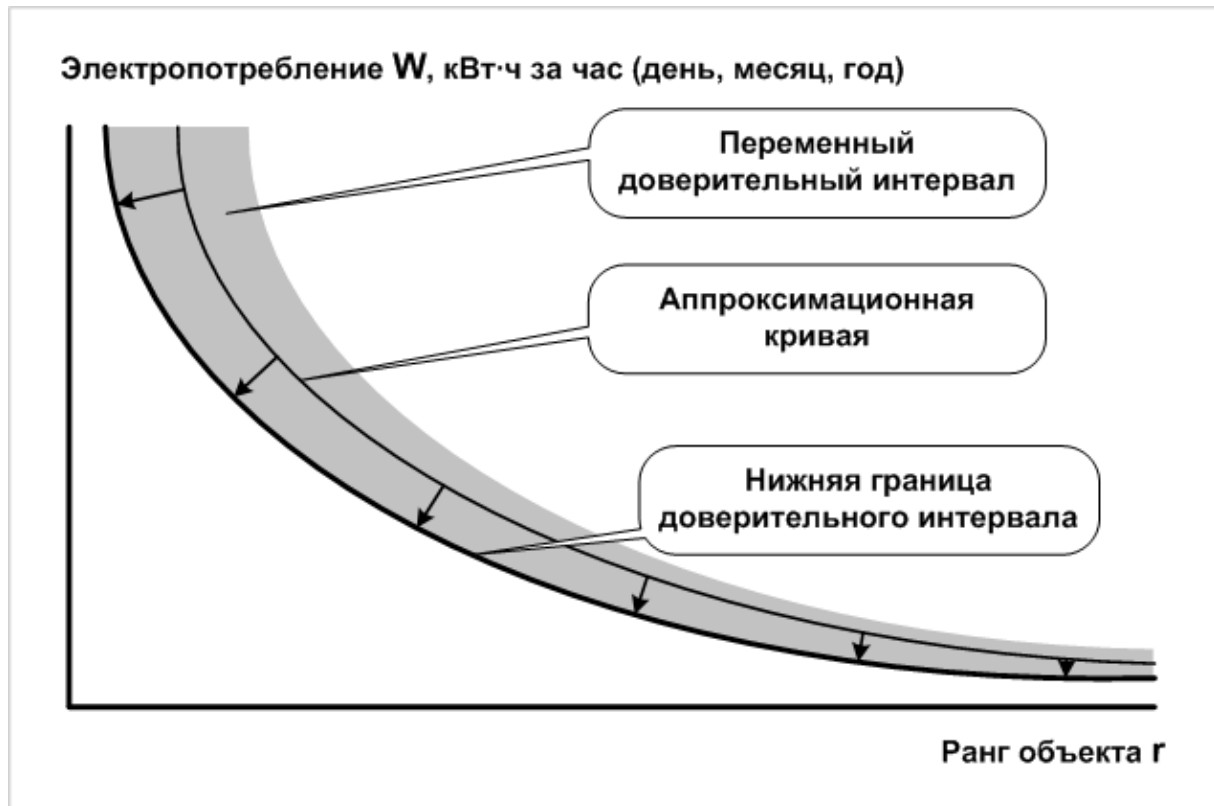


Рис. 5.9. К понятию оптимума электропотребления техноценоза (стрелками показано направление оптимизации)

Подобная задача может быть квалифицирована как шаговая задача динамического программирования с закрепленными левым и правым концами траектории (левый закрепленный конец – аппроксимационная кривая, правый – нижняя граница доверительного интервала на рисунке 5.9). Решается данная задача вариационными методами с использованием принципа оптимальности Беллмана. В данном случае можно говорить о следующей постановке задачи [86,88,106,108-112,115,116]: система – техноценоз описывается дискретным множеством переменных состояния

$$w \equiv (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n, \dots), \quad (5.20)$$

образующих определенным образом упорядоченную последовательность

$$w^0, w^1, w^2, \dots, w^t, \dots \quad (5.21)$$

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 прави-

ло, 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 [86,106,108], что в настоящее время без подобного упрощения практически невозможно получить численного решения задачи.

Каждое изменение состояния системы-техноценоза дается конечно-разностными уравнениями состояния [83,86,106,108,189,336]:

$$\begin{cases} w_i^{t+1} = f_i(w_1^t, w_2^t, w_3^t, \dots, w_n^t; u_1^{t+1}, u_2^{t+1}, u_3^{t+1}, \dots, u_n^{t+1}), \\ i = 1, 2, 3, \dots, n; \\ w^{t+1} = f(w^t, u^{t+1}). \end{cases} \quad (5.22)$$

Здесь управляющая переменная

$$u^{t+1} \equiv \{u_1^{t+1}, u_2^{t+1}, u_3^{t+1}, \dots, u_n^{t+1}\} \quad (5.23)$$

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 [106,108], 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 счисления), минимизирующей критерий-функционал:

$$\begin{aligned} \min_{u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)} \int_{t_0}^{t_F} f_0(w_1, w_2, \dots, w_n; u_1, u_2, \dots, u_n) dt &\equiv \\ \equiv S(w_1(t_0), w_2(t_0), \dots, w_n(t_0); w_1(t_F), w_2(t_F), \dots, w_n(t_F)) &\equiv \\ \equiv S(W_1, W_2, \dots, W_n), & \end{aligned} \quad (5.24)$$

удовлетворяющий уравнению с частными производными первого порядка (уравнение Гамильтона – Якоби, основанное на классическом гамильтониане с обобщенными координатами [83,86,106,108,189,336]):

$$M\left(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n; \frac{\partial S}{\partial w_1}, \frac{\partial S}{\partial w_2}, \frac{\partial S}{\partial w_3}, \dots, \frac{\partial S}{\partial w_n}\right) = 0, \quad (5.25)$$

где M – оптимальная (максимизированная) функция Гамильтона.

Как известно [83,86,106,108], в случае задачи шагового управления (в условиях дискретного времени, характерного для класса моделей оптимального управления электропотреблением техноценозов) функционал (5.24) вырождается в аддитивный критерий, минимизирующий

$$w_0^L = \sum_{t=0}^{L-1} (f_0(w^t, u^{t+1})) + f(w^L) = w_0^L(w^0), \quad (5.26)$$

где $L = 1, 2, \dots$ – количество рассматриваемых 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 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 выражается рекуррентным соотношением (где минимум определяется с задаваемыми ограничениями) [83,86,106,108,189,336]:

$$\begin{cases} S^L(X) = \min_{u^1} \{f_0(X, u^1) + S^{L-1} \cdot f(X, u^1)\} \quad (L = 2, 3, 4, \dots); \\ S^1(X) = \min_{u^1} (f_0(X, u^1)). \end{cases} \quad (5.27)$$

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 [106,108].

Рекуррентное соотношение (5.27) 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 линейную зависимость от потенциала энергосбережения объекта. При этом численным индикатором потенциала энергосбережения является относительная разность между эмпирическим значением электропотребления на данном временном интервале и значением электропотребления на нижней границе переменного доверительного интервала, соответствующим рангу рассматриваемого объекта (т.е. его дифлекс-параметр). Следовательно, в общем случае оптимальное управляющее воздействие для k -го объекта можно выразить следующим образом:

$$w_k^{t+1} = K_k^t \cdot w_k^t, \quad (5.28)$$

где K_k^t – коэффициент управляющего воздействия для k -го объекта техноценоза на t -ом временном интервале.

В соответствии с принятым принципом оптимальности коэффициент управляющего воздействия K_k^t можно задать как функцию $f_k^t(w_k^t)$, окончательно доопределяемую в комплексе исходных данных в зависимости от априорно принимаемых стратегий осуществления управляющего воздействия с целью снижения электропотребления, а также существующих ограничений на этот счет во внешней системе управления.

Итак, численное решение функционального уравнения (5.27) для простейшего класса оптимальных стратегий, в конечном итоге реализующих обоснованное выше представление о качестве процесса электропотребления объектов техноценоза по критерию близости к нижней границе переменного доверительного интервала (величине абсолютного дифлекс-параметра), может быть представлено в виде [83,86,106,108]:

$$K_k^t = f_k^t \left(\frac{w_k^t - (W^t(r_k) - W^*(r_k))}{W^t(r_k) - W^*(r_k)} \right), \quad (5.29)$$

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 распределения;
 $W^*(r_k)$ – соответствующее k -му рангу значение электропотребления на нижней границе интервала, получаемого по итогам ZP-нормирования.