

## 4.2. Моделирование процесса электропотребления

Недостатками существующей методологии, основанной на статической модели [14-20,48-50], являются короткий горизонт прогнозирования (1 – 2 года, после чего ошибка резко возрастает), а также невозможность реализации критериев, основанных на корректном сравнении вариантов управления электропотреблением. Устранение данных недостатков возможно лишь при условии создания динамической адаптивной модели, отражающей процесс электропотребления объектов техноценоза на среднесрочную перспективу (5 – 7 лет и более) (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Общий алгоритм реализации динамической модели электропотребления объектов техноценоза

Ключевым в модели является наличие динамической обратной связи, корректирующей базу данных по электропотреблению на основе результатов текущего моделирования. Динамический характер придает система входных параметров и стохастический аналитический аппарат, в основном основанный на имитационных принципах моделирования. Корректирую-

щее воздействие заключается в дополнении исходной базы данных модели, реализованной на предыдущих временных шагах, информацией об электропотреблении объектов техноценоза с учетом вероятных изменений в активном и пассивном информационном поле, а также системе исходных данных, характеризующих условия функционирования техноценоза на последующих временных шагах (рис. 4.11).

Моделирование электропотребления объектов техноценоза осуществляется с использованием стандартных преобразующих функций следующего вида [1,3,4,11,19,20,23,24,39,40,52,65,68]:

$$x = \varphi(\eta), \quad (4.23)$$

получаемых путем нелинейного преобразования функций распределения, т.е. решения относительно базовой случайной величины  $X$  уравнения:

$$\eta = \int_{-\infty}^x f(y)dy, \quad (4.24)$$

где  $\eta$  – случайное число, равномерно распределенное в интервале от 0 до 1, генерируемое датчиком случайных чисел;  
 $f(x)$  – функция плотности распределения величины  $x$ ;  
 $y$  – абстрактная переменная интегрирования.

Функции плотности распределения вероятностей электропотребления при моделировании выбираются следующим образом. Если на объект со стороны внутренней или внешней систем управления не оказывается управляющее воздействие, направленное на внедрение энергосберегающих технологий, то используется нормальный закон, если подобное воздействие оказывается – применяется закон Вейбулла – Гнеденко (рис. 4.12).

Итак, если электропотребление моделируется без управляющего воздействия, то используется нормальный закон с плотностью [20,24]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (4.25)$$

где  $m_x = M^1 = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$  – первый начальный момент распределения;

$$\sigma_x = \sqrt{D^1} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x)dx} \quad \text{– среднее квадратичное отклонение;}$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-m_x}{\sigma_x}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy - \text{функция распределения.}$$

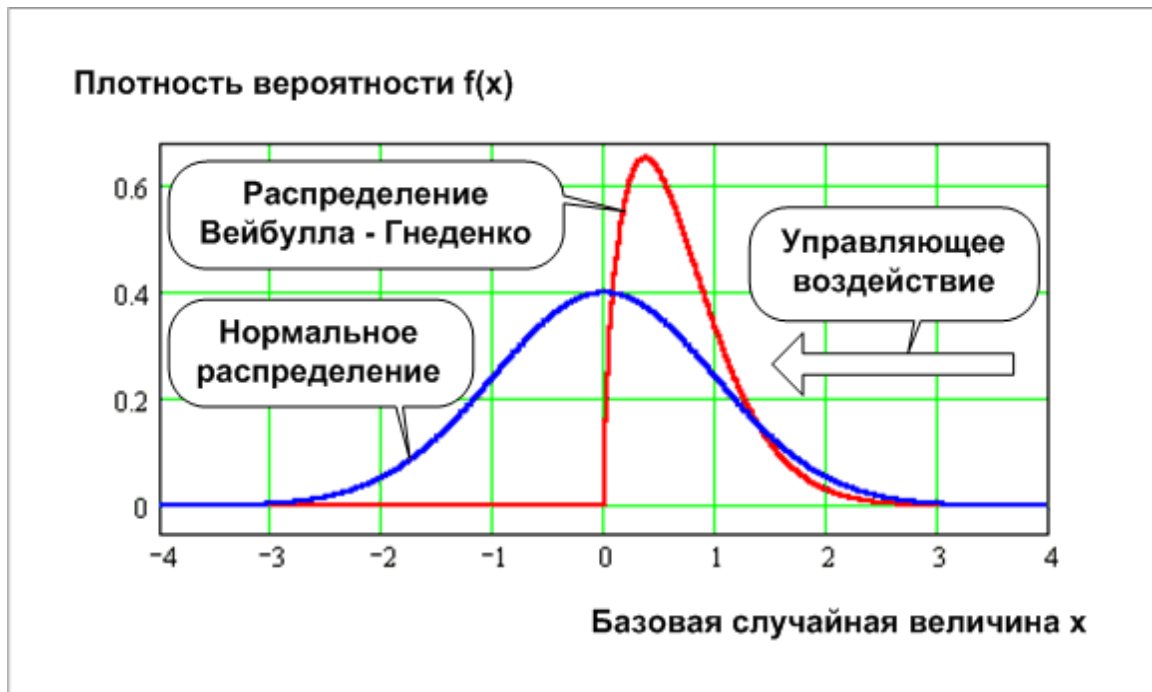


Рис. 4.12. Законы распределения, используемые для моделирования электропотребления

При наличии управляющего воздействия для моделирования используется закон Вейбулла – Гнеденко с плотностью [20,24]:

$$f(x) = \begin{cases} \alpha \lambda x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (4.26)$$

где  $\alpha$  и  $\lambda$  – параметры распределения ( $\alpha, \lambda > 0$ );

$$M^k = \lambda^{-\frac{k}{\alpha}} \Gamma\left(\frac{k}{\alpha} + 1\right) - k\text{-й начальный момент;}$$

$$D = \lambda^{-\frac{2}{\alpha}} \left( \frac{2}{\alpha} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha^2} \Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right) - \text{центральный момент;}$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{x-1} e^{-y} dy - \text{гамма-функция Эйлера [23].}$$

В ходе модельной реализации процесса электропотребления объектов техноценоза преобразующая функция общего вида (выражение (4.23)) используется следующим образом:

для нормального распределения:

$$w = m_w + \sigma_w \varphi_n(\eta, m_1, \sigma_1), \quad (4.27)$$

- где  $w$  – реализуемое в модели значение электропотребления объекта;
- $m_w$  и  $\sigma_w$  – математическое ожидание (среднее) и среднее квадратичное отклонение (стандарт) электропотребления, получаемые для объектов в ходе процедур прогнозирования и нормирования;
- $\varphi_n(\eta, m_1, \sigma_1)$  – преобразующая функция нормального распределения с параметрами  $(m_1, \sigma_1)$ ;
- $w = m_w + \sigma_w \xi$  – простейшая преобразующая функция, в которой используется генерируемое случайное число  $\xi$ , распределенное по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1;

для распределения Вейбулла – Гнеденко:

$$w = m_w + \sigma_w (\varphi_v(\eta, \alpha, \lambda) - 1), \quad (4.28)$$

- где  $\varphi_v(\eta, \alpha, \lambda)$  – преобразующая функция Вейбулла – Гнеденко с параметрами  $\alpha$  и  $\lambda$ ;

$$w = \left( -\frac{1}{\lambda} \ln(\eta) \right)^{\frac{1}{\alpha}} - \text{преобразующая функция закона для простейшего случая.}$$

Параметры  $\alpha$  и  $\lambda$  могут быть определены в результате символьного или численного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \lambda^{-\frac{1}{\alpha}} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) = m_1; \\ \lambda^{-\frac{2}{\alpha}} \left( \frac{2}{\alpha} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha^2} \Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right) = \sigma_1. \end{cases} \quad (4.29)$$

При необходимости изменения формы законов, в выражениях (4.27) и (4.28) должны быть трансформированы параметры  $m_1$  и  $\sigma_1$ .

Изменение параметра  $\alpha$  влияет на форму распределения Вейбулла – Гнеденко следующим образом (на положительном участке области распределения). При значениях  $0 < \alpha < 1$  распределение имеет гиперболическую форму, которая при строгом равенстве  $\alpha = 1$  вырождается в экспоненциальную. На интервале  $\alpha > 1$  оно приобретает характерную для лог-нормального и гамма-распределений асимметричную колоколообразную форму, которая с ростом  $\alpha$  приближается к симметричной. При моделировании процесса электропотребления параметр  $\alpha$  может быть поставлен в зависимость от амплитуды управляющего воздействия, стимулирующего процесс энергосбережения на объектах:

$$\bar{A} = \Psi_{\alpha}(\bar{U}), \quad (4.30)$$

где  $\bar{A}$  – вектор параметров  $\alpha$  объектов техноценоза;  
 $\bar{U}$  – вектор функций амплитуд управляющих воздействий, направленных на энергосбережение.

Параметр  $\lambda$  характеризует эксцесс распределения Вейбулла – Гнеденко. Следовательно, при моделировании он определяет своего рода «ширину зоны принятия решений» на реализацию мероприятий по энергосбережению. Чем больше значение  $\lambda$ , тем «зона принятия решения» меньше, а распределение имеет более острую вершину. Данный параметр может быть поставлен в зависимость от степени свободы системы управления по реализации воздействий, направленных на энергосбережение:

$$\bar{\Lambda} = \Psi_{\lambda}(\bar{V}), \quad (4.31)$$

где  $\bar{\Lambda}$  – вектор параметров  $\lambda$ ;  
 $\bar{V}$  – вектор функций, характеризующих степень свободы подсистем управления объектов по принятию решения на внедрение энергосберегающих технологий.

На практике оба вектора  $\bar{A}$  и  $\bar{\Lambda}$  в той или иной степени зависят от векторов  $\bar{U}$  и  $\bar{V}$ . В конечном итоге определение данной зависимости осуществляется через ожидаемую полезность [19,20,39] выполнения мероприятий по энергосбережению:

$$\bar{A}, \bar{\Lambda} = P(\bar{U}, \bar{V}, \bar{D}, \bar{T}), \quad (4.32)$$

где  $P$  – функционал ожидаемой полезности [19,20,39], определенный на гиперпространстве  $(\bar{U}, \bar{V}, \bar{D}, \bar{T})$ ;

- $\overline{\overline{D}}$  – пространство состояний, определяющее финансовую политику объектов техноценоза по стимулированию процесса энергосбережения и зависящее от времени, а также типа объекта;
- $\overline{\overline{T}}$  – пространство состояний, определяющее тарифную политику на рынке электроэнергии и зависящее от времени, а также выбранного варианта реализации политики.

При фиксированных областях в пространствах  $\overline{\overline{D}}$  и  $\overline{\overline{T}}$  применительно к выделенному  $k$ -му объекту с рангом  $r$  для определенной транзакции квазипараллельного алгоритма модели может быть определена интегральная функция полезности вида (подробнее – см. работу [20]):

$$\rho_r^{dt}(u, v) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \rho(u, v) p(u, v) du dv, \quad (4.33)$$

- где  $\rho_r^{dt}(u, v)$  – ожидаемая полезность [20,39] управляющего воздействия для  $k$ -го объекта (с рангом  $r$ ) в условиях  $d$ -го варианта финансовой политики по стимулированию процесса энергосбережения и  $t$ -го варианта тарифной политики, реализуемой на рынке электроэнергии;
- $\rho(u, v)$  – функция полезности, соответствующая значениям функций  $u$  и  $v$ ;
- $p(u, v)$  – функция вероятности, оценивающая реализацию значений  $u$  и  $v$ .

Таким образом, зависимость (4.33) просчитывается для каждого  $k$ -го объекта в отдельности. Причем интегрирование здесь может быть заменено суммированием при дискретизации спектра значений  $u$  и  $v$ .

Возможен вариант модельной реализации процесса электропотребления с использованием только нормального распределения (рис. 4.13). При этом параметры  $m_w$  и  $\sigma_w$  определяются как функции  $u$  и  $v$ :

$$\overline{M}, \overline{\Sigma} = P(\overline{U}, \overline{V}, \overline{\overline{D}}, \overline{\overline{T}}), \quad (4.34)$$

- где  $\overline{M}$  – вектор математических ожиданий значений электропотребления объектов техноценоза;
- $\overline{\Sigma}$  – вектор средних квадратичных отклонений.

Предполагается, что при отсутствии управляющих воздействий, направленных на энергосбережение, в зависимости (4.27) используются значения математического ожидания и среднего квадратичного отклонения электропотребления, непосредственно получаемые для объектов тех-

ноценоза в ходе процедур прогнозирования и нормирования (см. п. 4.1). При наличии же такового воздействия в (4.27) подставляются значения, получаемые из выражений (4.33) и (4.34). При численной реализации преобразующих функций в процессе имитационного моделирования в (4.34) используются среднее и стандарт электропотребления.

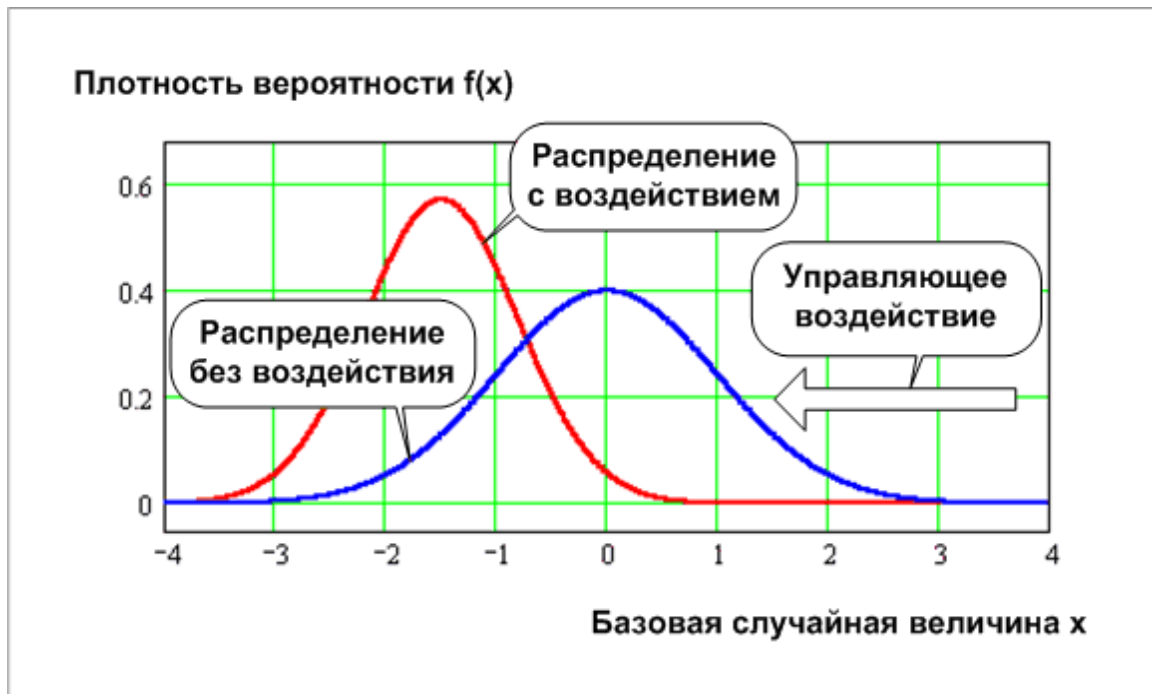


Рис. 4.13. Моделирование процессов электропотребления с использованием нормального распределения

Динамика изменения формы нормального распределения в ходе реализации управляющего воздействия по внедрению мер, направленных на энергосбережение, отражается следующим образом (рис. 4.14):

$$\begin{cases} m = m_0 + m_1 e^{-m_2 t}; \\ \sigma = \sigma_0 + \sigma_1 e^{-\sigma_2 t}, \end{cases} \quad (4.35)$$

где  $m$  и  $\sigma$  — математическое ожидание и стандарт электропотребления, реализуемого в модели;  
 $m_0$  и  $\sigma_0$  — математическое ожидание и стандарт электропотребления объекта техноценоза в начальный момент модельной реализации;  
 $m_1, \sigma_1, m_2, \sigma_2$  — параметры двухпараметрической экспоненциальной аппроксимационной формы, отражающей динамику изменения нормального распределения;  
 $t$  — модельное время квазипараллельного режима реализации транзакций.

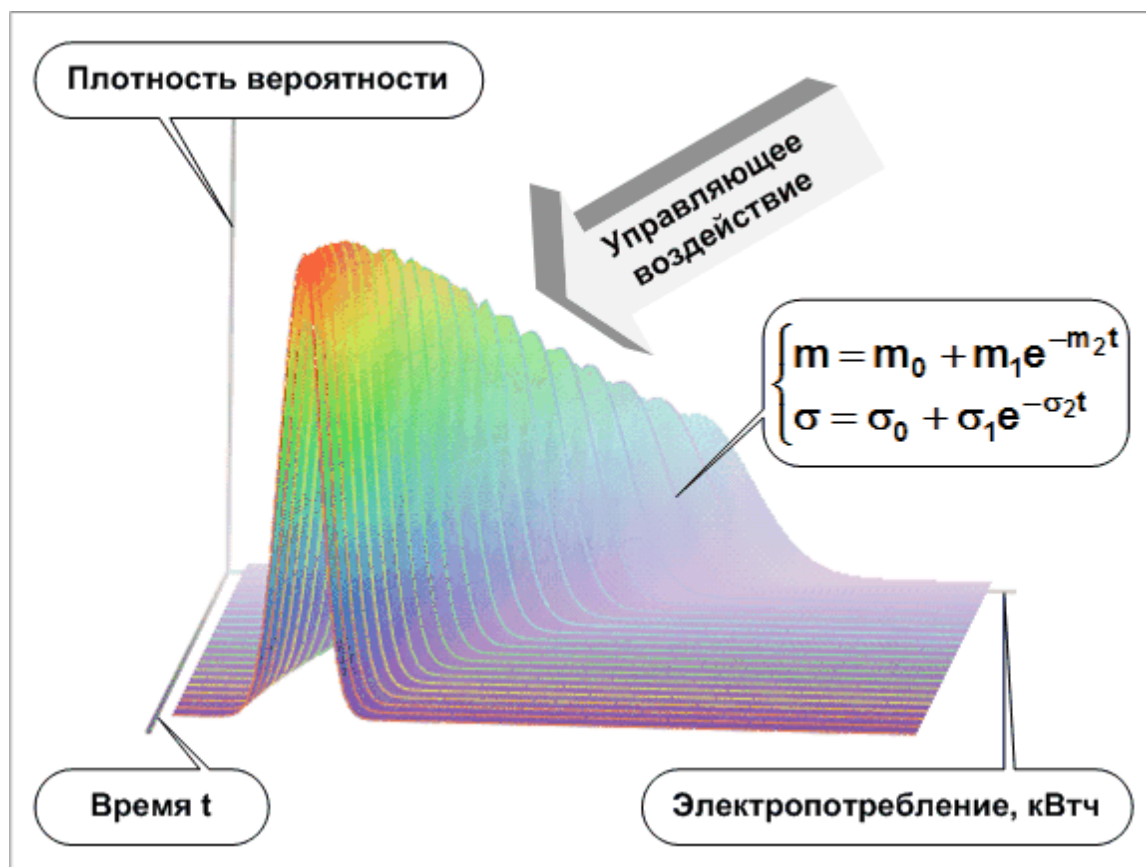


Рис. 4.14. Изменение формы нормального распределения при модельной реализации управляющего воздействия

В конечном итоге по результатам модельной реализации преобразующих функций (4.27) и (4.28) формируются две матрицы, одна из которых  $[W_1]$  содержит значения электропотребления объектов техноценоза на определенном временном интервале без реализации энергосберегающих управленческих воздействий, а вторая  $[W_2]$  – с реализацией соответствующих воздействий. Кроме того, параллельно формируются еще две матрицы, одна из которых  $[Z_1]$  содержит значения затрат на оплату за потребленную электроэнергию на объектах техноценоза в условиях первого варианта  $[W_1]$ , а вторая  $[Z_2]$  – затрат на внедрение энергосберегающих технологий при реализации второго варианта  $[W_2]$  (подробнее – см. [20]). Следует отметить, что построение кумулятивной зависимости типа (4.33) для техноценоза в целом представляется некорректным ввиду негауссовости разброса значений параметров электропотребления. Подобную выборку следует обрабатывать ТЦ-методами, основанными на цифровых ранговых параметрических распределениях [7-20,28-37,41], при этом исходные данные для анализа берутся из матриц  $[W_1]$ ,  $[W_2]$ ,  $[Z_1]$  и  $[Z_2]$ .