

УДК 621.311

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ИМИТАЦИОННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ  
ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ****БАЛАМЕТОВ А.Б., \*МАМЕДОВ С.Г., \*АЛИЕВ Х.Т., ХАЛИЛОВ Э.Д.,  
БАХЫШОВ Э.Д.***Азербайджанский Научно-Исследовательский и Проектно-изыскательский  
институт Энергетики, \*АО «Азерэнерджи»*

Потери энергии в элементах электрической сети являются функцией характеристик графиков нагрузки. В статье рассматривается методика оценки потерь энергии имитационным моделированием графиков электрических нагрузок по продолжительности представлением их в виде плавно убывающей непрерывной функции.

Графики нагрузки распределительных сетей 6 - 10 кВ и выше энергосистем являются графиками смешанной нагрузки и имеют самые различные конфигурации. Графики нагрузки в распределительных сетях формируются под влиянием множества факторов и обычно по продолжительности имеют вид плавно убывающих функций, которые могут быть аппроксимированы различными аналитическими зависимостями.

Применяемые на практике формулы [1-7], использующие два параметра коэффициента заполнения графика нагрузки  $k_3$  и  $k_{\min}$ , не могут полностью отразить различия графиков нагрузки. С другой стороны только эти параметры известны при отсутствии графика. Поэтому погрешность в определении  $k_{\phi}$  через  $k_3$  и  $k_{\min}$  полностью не может быть устранена. Величина этой погрешности растет для графиков отличных от типовых.

В [6] на основе аппроксимации вариантных расчетов для всех возможных конфигураций графика нагрузки по продолжительности с дискретностью 0.1 по обеим осям ( $T$  и  $k_3$ ) предложены формулы, которые по утверждению авторов (6) имеют нулевую систематическую погрешность. Формулы для расчета числа часов наибольших потерь, и коэффициента формы графиков нагрузки имеют значительные систематические погрешности [7].

В [7-11] ставится задача по получению более точных зависимостей  $k_{\phi}$  с вводом дополнительного параметра, времени продолжительности режима с минимальной нагрузкой -  $T_{\min}$ . В качестве дополнительного параметра предлагается вводить коэффициент, характеризующий относительную продолжительность минимальной нагрузки графика -  $k_{\min}$ . Предложены эмпирические зависимости для коэффициента формы графика нагрузки с вводом третьего параметра, продолжительности минимальной нагрузки и имеющие лучшие характеристики аппроксимации.

Для расчета потерь энергии по методу средних нагрузок используют выражение с коэффициентом формы. А расчет коэффициента формы сводился к получению выражений имеющих наглядный и простой для ручного вычисления вид. Это во многом позволяло также в простой форме объяснять закономерности влияния параметров режима на нагрузочные потери электроэнергии. Эти выражения расчета потерь и в дальнейшем будут востребованными. Однако, темпы развития компьютерных технологий с большими возможностями и их применение во всех сферах жизнедеятельности (обучения, управления) позволяют и требуют применения вычислительных алгоритмов, позволяющих повысить точность моделирования. При

этом увеличивается сложность вычислений и в некоторой степени теряется простота объяснения закономерностей влияния параметров режима на нагрузочные потери электроэнергии.

В данной статье рассматривается имитационное моделирование графиков нагрузки, позволяющее более гибкое моделирование потерь энергии, оценкой коэффициента формы по графикам нагрузки по продолжительности как непрерывной функции.

**Аппроксимирующие зависимости графиков нагрузки.** Графики нагрузки по продолжительности могут быть выражены разными функциями [1-5]: параболической при  $k_3 \geq 0.7$ ; линейной при  $k_3 = 0.5 \div 0.7$ ; экспоненциальной при  $k_3 = 0.25 \div 0.5$ ; гиперболической линейной при  $k_3 \leq 0.25$  и другими видами функций.

В [6] график нагрузки по продолжительности представляется в виде плавно убывающей функции. Аппроксимация графиков нагрузки по продолжительностям проводится следующими аналитическими зависимостями тока во времени:

$$I = I_{\max} - (I_{\max} - I_{\min}) \left( \frac{t}{T} \right)^{\lambda} \quad (1)$$

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  значения максимальных и минимальных токов за расчетный период времени  $T$ .

Вспомогательный коэффициент  $\lambda$  определяется по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{I_{\text{cp}} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\text{cp}}}$$

Аналитические зависимости (1) и (2) являются интегрируемыми. Поэтому можно получить все необходимые характеристики графика нагрузки. Аппроксимация графиков нагрузки аналитическими зависимостями вида (1) и (2) хотя значительно повышает точность моделирования потерь энергии, однако полностью не устраняет систематические погрешности [9]. В связи с этим, в работах [7-9] были предприняты попытки получения эмпирических зависимостей устраняющие эти недостатки.

В [10] рассмотрены вопросы выбора вида аппроксимирующих функций графиков нагрузки аналитическими зависимостями: показательной функцией и функцией полунормального вида.

Аппроксимация графиков нагрузки экспоненциальными зависимостями имеет вид

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-\alpha_1 t^{\rho}} \quad (3)$$

Аппроксимация графиков нагрузки зависимостями (3) можно представить также в виде

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-(\alpha_2 t)^{\rho}} \quad (4)$$

Здесь  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\rho$  - параметры масштаба, определяемые в результате аппроксимации.

Для анализа параметров реальных графиков нагрузки были определены параметры  $k_3$ ,  $P_{\min}$ ,  $t_{\min}$  некоторых типовых графиков нагрузки в соответствии справочными данными [10]. Результаты предварительной оценки потерь энергии [10] с использованием аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки по продолжительности вида (3) показывают, что при этом точность моделирования значительно растет.

Далее будет использована аппроксимация графиков нагрузки функцией вида (4).

Повышение точности моделирования потерь энергии и снижение систематических погрешностей, возможно, обеспечить путем подбора вида аппроксимирующей зависимости графика нагрузки по продолжительности.

В [10] были сопоставлены характеристики аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки моделированием семейства графиков нагрузки при разных  $k_3$ ,  $I_{\min}$ ,  $I_{\max}$  и  $\lambda$  степенной функцией вида (1), (2) и экспонентой вида (3) для разных  $\rho$  и  $\alpha$ . Аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида (3) позволяет получить возможные пределы распределения  $k_\phi$  близкие к реальным.

**Постановка задачи моделирования характеристик графиков нагрузки по продолжительности.** Определим параметры  $\alpha$  и  $\rho$  аппроксимацией графиков нагрузки зависимостями вида (4), которые являются также неявной функцией параметров графика нагрузки  $k_3$ ,  $k_{\min}$  и  $k_{t\min}$ .

$$k_3 = \int_0^1 (I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-(\alpha t)^\rho}) dt \quad (5)$$

Дисперсия для заданного графика нагрузки определяется по выражению

$$D_i = \int_0^1 (I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-(\alpha t)^\rho})^2 dt - k_3^2 \quad (6)$$

Для вычисления определенного интеграла (5) и (6) используются численные методы интегрирования, в частности метод Симпсона подбором соответствующих  $\alpha$  и  $\rho$ . В общем случае графики нагрузки  $k_3 = \text{const}$  имеют множество решений  $\alpha_i$  и  $\rho_i$  и разные дисперсии.

Подбор коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\rho_i$ , обеспечивающих множество решений, производится решением задачи минимизации

$$\left[ \int_0^1 I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-(\alpha t)^\rho} dt - k_{\text{зад}} \right]^2 = 0 \quad (7)$$

с учетом ограничений на  $k_{\min}$  и  $k_{t\min}$  в виде

$$\begin{aligned} 0 &\leq k_{\min} < 1, \\ 0 &\leq k_{t\min} < 1. \end{aligned}$$

Здесь  $k_{\text{зад}}$  – является задаваемым значением коэффициента заполнения для имитационного моделирования графика нагрузки.

Непосредственное интегрирование выражений (5-7) не представляется возможным и поэтому требуется применение численных методов.

При задании  $\rho$  производится минимизация (7) подбором значения  $\alpha$ , обеспечивающим заданное значение  $k_3$  по (5). Если при заданном  $\rho$  не удастся обеспечить заданное значение  $k_3$ , то изменением  $\rho$  (увеличением) добиваются получения множества решений  $\rho_i$  и  $\alpha_i$ .

Интервалы изменения  $\alpha$  и  $\rho$  зависят от формы графика нагрузки  $k_3$  и  $k_{\min}$ . Моделирование графика нагрузки соответствующее заданным значениям параметров  $k_3$  и  $k_{\min}$  не всегда удастся обеспечить. К примеру задание параметра  $\alpha=2$  не обеспечивает заданной  $k_3$ ,  $k_{\min}$  и  $k_{t\min}$  путем выбора  $\alpha$ .

Для обеспечения адекватной аппроксимации (4), обеспечивающей равенство  $k_3 = k_{\text{зад}}$ , предлагается использовать в качестве предварительного критерия завершения подбора параметров по точности условие

$$(I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-(\alpha t)^{\rho_i}} \leq \varepsilon_{k_3} \quad (8)$$

Здесь предлагается принимать  $\varepsilon_{k_3} = 0.0005$ .

Если условие (8) выполняется, то можно считать, что (4) обеспечивает аппроксимацию, имеющую приемлемую погрешность.

Относительная продолжительность минимальной нагрузки определяется из соотношений эквивалентного трехступенчатого графика

$$\begin{aligned} t_{\max} \cdot 1 + t_{\text{cp}} \cdot k_3 + t_{\min} \cdot k_{\min} &= k_3, \\ t_{\max} + t_{\text{cp}} + t_{\min} &= 1, \end{aligned}$$

принимая  $t_{\text{cp}} = 0.25 \cdot (t_{\max} + t_{\min})$ ,

После преобразований получим

$$t_{\min} = \frac{0.8 \cdot (1 - k_3)}{1 - k_{\min}}$$

Предварительные значения интервалов изменения относительной продолжительности минимальной нагрузки ( $k_{t\min} = t_{\min}$ ) определяются из условия

$$\frac{0.6 \cdot (1 - k_3)}{1 - k_{\min}} < k_{t\min} < \frac{(1 - k_3)}{1 - k_{\min}} \quad (9)$$

При этом требуется проверка условия равенства расчетного значения коэффициента заполнения заданному значению.

Продолжительность минимальной нагрузки определяется установлением момента наступления минимальной нагрузки графика по условию

$$(I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-\alpha_i t_{pi}} - k_{t\min} \leq \varepsilon_{kt\min}. \quad (10)$$

Условие точности поиска  $k_{t\min}$  предлагается принимать в пределах  $\varepsilon_{kt\min} = 0.001 \div 0.01$ .

**Имитационное моделирование семейства графиков нагрузки для определения интервалов изменения коэффициента формы.** Моделирование предельных графиков нагрузки осуществляется из условия получения наименьших и наибольших значений для  $k_{\text{ф}}^2$ . При этом, ордината одного предельного графика обычно соответствует  $I = I_{\max}$ , и имеет наибольшую продолжительность максимума, а в остальной части расчетного времени нагрузка сохраняет минимальное постоянное значение, и график характеризуется наибольшим значением  $k_{\text{ф}}^2$ . Ордината другого предельного графика имеет кратковременный максимум, а в остальной части расчетного времени нагрузка сохраняет постоянное значение. Этот график характеризуется наименьшим значением  $k_{\text{ф}}^2$ . Использование графиков сводит к минимуму трудозатраты по определению возможных интервалов изменения коэффициента формы графика нагрузки.

Методика моделирования графика нагрузки (4) с  $k_3$  (5) сводится к задаче поиска параметров  $\alpha$  и  $\rho$  из условия  $(k_{\rho} - k_3)^2 = \text{мин}$ . Для этой цели используется квадратичная интерполяция функции (7) для значений  $\alpha$  при заданном  $\rho$  в трех различных точках

$$f(\alpha) = a + b\alpha + \alpha^2 \quad (12)$$

Алгоритм имитационного моделирования графиков нагрузки основан на итерационном методе покоординатного спуска и метода квадратичной интерполяции. В алгоритме для поиска минимума функции использован метод квадратичной интерполяции [12]. Блок схема программы имитационного моделирования графиков нагрузки для сопоставления расчетных моделей распределительных сетей приведена на рис 1. Исходными вводимыми данными являются: коэффициент заполнения графика нагрузки  $k_3$ , отношение минимальной нагрузки к максимальной  $k_{\min}$ , относительная продолжительность минимальной нагрузки графика –  $k_{t\min}$  определяемая как отношение продолжительности минимальной нагрузки к продолжительности расчетного периода. Имитационное моделирование семейства графиков нагрузки производится заданием

параметров  $k_3$ ,  $k_{\min}$ ,  $k_{t\min}$ . При этом определяются  $\alpha$  и  $\rho$ . При задании нижних и верхних пределов изменения  $\rho$  ( $\rho_{\text{ниж}} \leq \rho \leq \rho_{\text{верх}}$ ), определяются  $\alpha$  и  $k_{t\min}$ . Предусмотрено задание нижних и верхних пределов изменения  $\rho$  и шага изменения  $\Delta\rho$ .

Обычно за 10-60 итераций удается получить практически приемлемые точности аппроксимации для одного графика нагрузки при помощи квадратичной интерполяции и коррекции  $\alpha$ .

**Рекомендуемые значения  $\alpha$  и  $\rho$  в зависимости от формы графика нагрузки.** Моделирование графика нагрузки соответствующее заданным значениям параметров  $k_3$ ,  $k_{\min}$  и  $k_{t\min}$  не всегда удается обеспечить. К примеру задание параметра  $\rho=2$  не обеспечивает заданной  $k_3$  и  $k_{\min}=0.1$  путем выбора  $\alpha$ . При  $k_3 > 0.5$  не удастся адекватная аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида (4) с  $\rho < 2$  подбором  $\alpha$ .

Ниже приводятся рекомендуемые значения  $\alpha$  и  $\rho$  для аппроксимации графиков нагрузки функцией вида (4) по продолжительности в зависимости от  $k_3$ . При заданном  $k_3$  и  $k_{\min}$  и относительном росте  $\rho$  растет дисперсия и значение  $\alpha$ . При  $\alpha = \text{const}$  и увеличении  $\rho$ ,  $k_3$  уменьшается. При увеличении  $\alpha$  и  $\rho$  дисперсия растет. Для получения относительно больших  $k_3$  необходимо задавать относительно большие значения  $\rho$ . Для получения кривых с большими продолжительностями минимальной нагрузки  $k_{t\min}$  необходимо увеличить величину  $\alpha$ . Для получения кривых с большими продолжительностями максимальной нагрузки также необходимо увеличить величину  $\alpha$ .

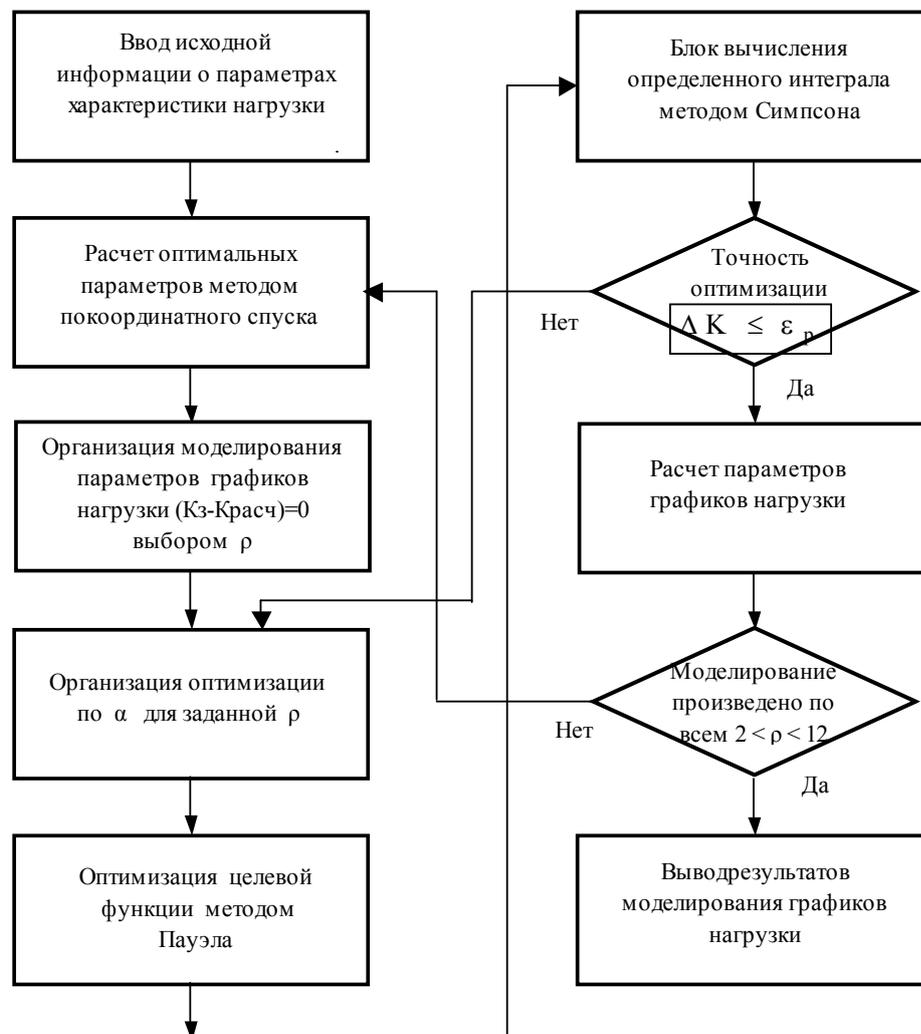


Рис. 1. Блок схема имитационного моделирования графиков нагрузки.

Интервалы изменения дисперсии для графиков нагрузки с заданным  $k_3$  определены путем задания  $\rho$  в области  $1.25 \leq \rho \leq 20$  и шага изменения  $\Delta\rho$   $0.25 \leq \Delta\rho \leq 1$

выбором  $\alpha$  соответствующие заданным параметрам  $k_z$  и  $k_{\min}$ . Обычно для нормальных графиков нагрузки  $\alpha$  меняется в пределах  $1.2 < \alpha < 6$ .

На рис 2 приводится экранная форма ввода и вывода результатов расчета программы имитационного моделирования графиков нагрузки.

В программе предусмотрено также отображение на мониторе зависимости изменения квадрата коэффициента формы, полученной имитационным моделированием графиков нагрузки от  $k_{\min}$  и  $k_{\min}$ .

**Определение расчетных интервалов потерь электроэнергии.** Расчетные интервалы потерь электроэнергии определяются имитационным моделированием графиков нагрузки по продолжительности представлением их в виде плавно убывающей непрерывной функции. При допущении, что наиболее часто встречающиеся характеристики графиков нагрузки на практике являются со средними параметрами и семейство графиков подчиняется известным законам распределения, можно получить ниже следующее выражение для оценки потерь.

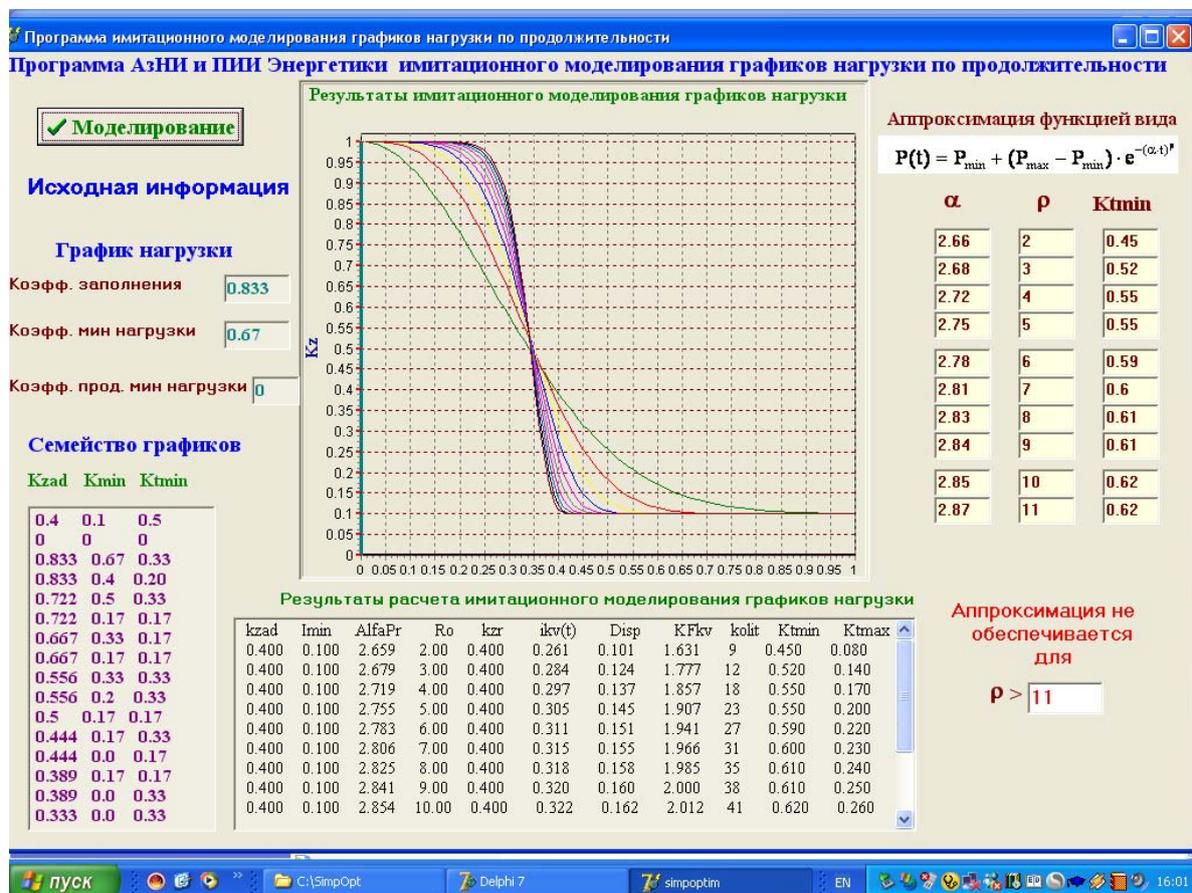


Рис 2. Экранная форма ввода и вывода программы имитационного моделирования графиков нагрузки.

Нижнюю и верхнюю границы интервала, в котором фактическое значение потерь оказывается с доверительной вероятностью 95%, определяют по формулам:

$$\Delta W_{\min} = \Delta W_p \cdot \frac{k_{\text{фмин}}^2}{k_{\text{фср}}^2}, \quad \Delta W_{\max} = \Delta W_p \cdot \frac{k_{\text{фмакс}}^2}{k_{\text{фср}}^2}. \quad \text{где } \Delta W_p -$$

расчетное значение потерь, определяемое в соответствии с  $k_{\text{фср}}^2$ ;  $k_{\text{фмин}}^2$ ,  $k_{\text{фср}}^2$ ,  $k_{\text{фмакс}}^2$  — коэффициенты квадрата формы соответствующие минимальному, среднему и максимальному графикам нагрузки, полученные имитационным моделированием.

Коэффициенты квадрата формы соответствующие минимальному, среднему и максимальному графикам нагрузки определяются методом подбора параметров аппроксимации графиков нагрузки по программе имитационного моделирования.

На рис 3. приведены результаты моделирования квадрата коэффициента формы от продолжительности минимума нагрузки для  $k_3=0.4$  от  $k_{min}$  при оценке  $k_{tmin}$ .

В зависимости от масштабных коэффициентов  $\alpha$  и  $\rho$  графиков нагрузки для данной задачи значение  $k_{\phi}^2$  меняется в пределах  $1.3 \div 2.07$ . Таким образом, аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида (4) позволяет оценить возможные пределы изменения  $k_{\phi}$  и потерь энергии. Относительная продолжительность минимальной нагрузки графика  $k_{tmin}$  для семейства графиков полученных имитационным моделированием меняется в пределах  $0.04 \div 0.29$ . Наиболее вероятное значение  $k_{\phi}^2$  можно выбрать на основе дополнительной информации о  $k_{tmin}$  реального графика нагрузки. Заданием наиболее вероятного значения  $k_{\phi}^2$  возможно определить расчетные интервалы потерь электроэнергии.

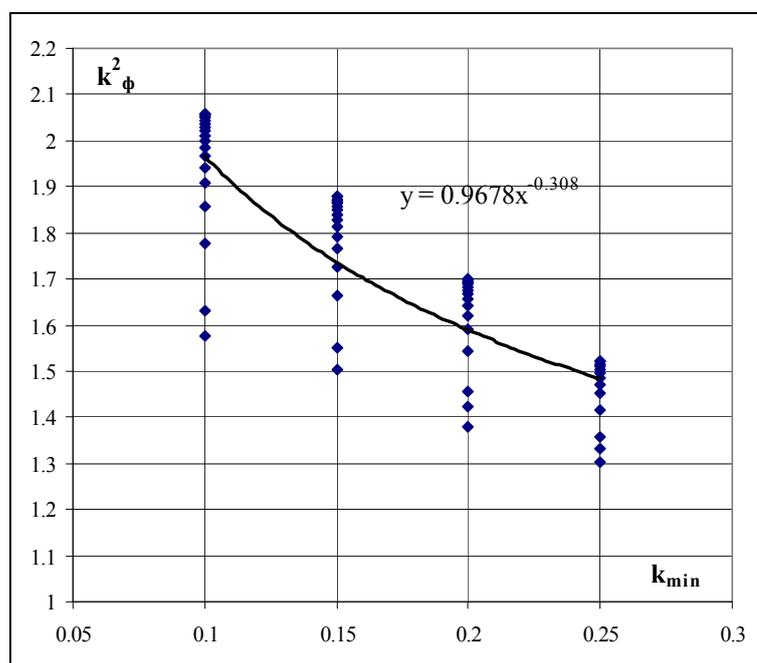


Рис. 3. Зависимость квадрата коэффициента формы полученная имитационным моделированием графиков нагрузки для  $k_3=0.4$  от  $k_{min}$  ( $k_{tmin}$ ).

## ВЫВОДЫ

1. Предлагается математическая постановка задачи имитационного моделирования характеристик графиков нагрузки по продолжительности как непрерывной функции экспоненциальной функцией, путем подбора масштабных коэффициентов.

2. Разработана программа для моделирования характеристик графиков нагрузки экспоненциальной функцией. Получены интервалы изменения  $\alpha$  и  $\rho$  в зависимости от формы графика нагрузки  $k_3$ ,  $k_{min}$  и  $k_{tmin}$ . Для моделирования графиков нагрузки рекомендуется экспоненциальная функция с интервалами изменения масштабных коэффициентов  $\alpha$  и  $\rho$ :  $1.25 \leq \rho \leq 20$  и  $1.2 < \alpha < 6$ .

3. При имитационном моделировании графиков нагрузки имеется возможность анализа семейства графиков и оценки интервалов изменения потерь энергии.

4. Результаты расчетов потерь энергии позволяют сделать вывод о возможности повышения точности моделирования потерь электроэнергии имитационным моделированием графиков нагрузки.

1. *Клебанов Л.Д.* Вопросы методики определения и снижения потерь электрической энергии в сетях. Л: Изд-во ЛГУ, 1973, - 72 с.
2. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. М., «Мир», 1969, 395 с.
3. *Л.П. Анисимов, Л.С. Левин, В.Г. Пекелис.* Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях. Электричество 1975, №4, с.27-30.
4. *Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч.* Потери мощности и энергии в электрических сетях. Под ред. Г.Е. Поспелова. М.: Энергоиздат, 1981. - 216 с.
5. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. В.Э.Воротницкий, Ю.С.Железко, В.Н.Казанцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1983.-368 с.
6. *Железко Ю.С., Савченко О.В.* Определение интегральных характеристик графиков нагрузки для расчета потерь электроэнергии в электрических сетях. Электрические станции № 10 – 2001. с. 9-13.
7. *Баламетов А.Б., Мамедов С.Г.* Погрешности определения коэффициента формы при расчете потерь энергии в электрических сетях энергосистем. Проблемы энергетики 2000, №3, с. 33-40.
8. *Баламетов А.Б., Мамедов С.Г.* Зависимости определения коэффициента формы графика при расчетах потерь электроэнергии. Проблемы энергетики 2001, №2, с. 3-10.
9. *Баламетов А.Б., Мамедов С.Г.* Об определении коэффициента формы при расчетах потерь электроэнергии с учетом ограничений в электроснабжении. Энергетика ... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). -2002.- №2, с. 21-29.
10. *Баламетов А.Б., Алиев Х.Т., Халилов Э.Д., Мамедов С.Г.* Об оценке потерь энергии при вероятностном представлении графиков электрических нагрузок. Проблемы энергетики 2007 №1 стр. 17-25.
11. *А.Б.Баламетов* Методы расчета потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем. - Баку: Елм, 2006, - 337 стр.
12. *Поляк Б.Е.* Введение в оптимизацию. М: Наука, 1983.

## **YÜK QRAFİKLƏRİNİN İMİTASIYA MODELLEŞDİRİLMƏSİ İLƏ PAYLAYICI ELEKTRİK ŞƏBƏKƏLƏRİNDƏ ELEKTRİK ENERJİSİ İTKİLƏRİNİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ METODİKASI**

**BALAMETOV Ə.B., MƏMMƏDOV S.Q., ƏLİEV X.T.,  
XƏLİLOV E.D., BAXIŞOV E.D.**

Elektrik şəbəkəsinin elementlərində enerji itkiləri yük qrafiklərinin funksiyasıdır. Məqalədə elektrik yüklərinin zamandan asılılıq qrafiklərinin tədricən azalan və kəsilməz funksiyaları şəklində verilməsi yolu ilə imitasiya modelləşdirilməsi və enerji itkilərinin qiymətləndirilməsi metodikasına baxılır.

## **THE TECHNIQUE OF AN ESTIMATION OF LOSSES OF ENERGY BY IMITATING MODELLING OF SCHEDULES OF ELECTRIC LOADINGS IN DISTRIBUTIVE NETWORKS**

**BALAMETOV A.B., MAMEDOV S.Q., ALIEV H.T.,  
HALILOV E.D., BAXISHOV E.D.**

Energy losses in elements of an electric network are function of characteristics of production schedules. In article the technique of an estimation of losses of energy by imitating modelling of schedules of electric loadings on duration their representation in the form of smoothly decreasing continuous function is considered.