
УДК 621.311

А. Б. Баламетов, д-р техн. наук, **Э. Д. Халилов**, канд. техн. наук,
Х. Т. Алиев, **Э. Д. Бахышов**, аспирант
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
(Республика Азербайджан, Аз 1012 Баку, пр. Зардаби, 94,
тел. (+99412) 430-15-51, E-mail: balametov.aznnie@gmail.com)

Имитационное моделирование графиков нагрузки для расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях

(Статью представил чл.-кор. НАН Украины В. В. Васильев)

Разработаны методика, алгоритмы и программа оценки погрешности определения квадрата коэффициента формы при малых значениях коэффициента заполнения имитационным моделированием графиков электрических нагрузок по продолжительности в виде непрерывной функции, что позволяет повысить точность расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях.

Розроблено методику, алгоритми та програму оцінки похибки визначення квадрата коефіцієнта форми при малих значеннях коефіцієнта заповнення імітаційним моделюванням графіків електричних навантажень по тривалості у вигляді неперервної функції, що дозволяє підвищити точність розрахунку втрат електроенергії у розподільних мережах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: потери электроэнергии, график нагрузки, имитационное моделирование.

При расчете потерь энергии в распределительных электрических сетях используются характеристики графика нагрузки. Известные методы расчета потерь электроэнергии в электрических сетях [1] основаны на нормальных условиях эксплуатации и функционирования электроэнергетической системы и бесперебойном электроснабжении потребителей. При электроснабжении потребителей с ограничениями и перерывами используются эмпирические формулы для определения числа часов наибольших потерь и коэффициента формы графика нагрузки имеют существенные погрешности, и их применение становится неоправданным.

В методах расчета потерь электроэнергии используются графики нагрузки по продолжительности. Ранее графики нагрузки имели устойчивые характеристики и позволяли вести расчет потерь энергии по пригодным

для этих условий упрощенным формулам. В настоящее время произошли изменения в структуре потребления электроэнергии и графики нагрузки фидеров 6—10 кВ имеют самые разнообразные формы.

Внедрение современных информационных и коммуникационных технологий позволяет получить информацию о графиках нагрузки из электронных счетчиков, которые в настоящее время обладают большими возможностями по хранению, передаче и обработке режимной информации, удовлетворяют требованиям времени и изменяющимся условиям режима потребителей. В связи с этим меняются требования к методам, алгоритмам и программам расчета потерь электроэнергии.

Развитие энергетики в этих условиях требует решения задачи расчета технологического расхода электроэнергии на ее передачу с использованием новых подходов, позволяющих обосновать технико-экономические показатели энергопредприятий. Однако в случаях отсутствия на фидерах электронных счетчиков или текущих данных о графиках нагрузки возникает необходимость использования эмпирических формул.

Наиболее информативными являются известные типовые графики нагрузки отдельных групп потребителей. График нагрузки фидера формируется из разных групп потребителей. Из комбинации графиков нагрузки формируется суммарный график фидера. Информация о вероятностных характеристиках графиков нагрузки обычно не известна.

Применяемые на практике формулы определения коэффициента формы k_{ϕ} при расчете потерь энергии не достаточно полно отражают различия графиков нагрузки. Поэтому погрешность в определении k_{ϕ}^2 с помощью коэффициента заполнения графика нагрузки k_z и коэффициента минимальной нагрузки k_{\min} полностью не может быть устранена. Величина этой погрешности возрастает для графиков, отличных от типовых [1—3].

До настоящего времени расчет потерь энергии по методу средних нагрузок сводился к использованию выражений с коэффициентом формы, а расчет коэффициента формы — к получению выражений, имеющих наглядный и простой для ручного вычисления вид. Это позволяло в простой форме объяснять закономерности влияния параметров режима на нагрузочные потери электроэнергии. Однако темпы развития компьютерных технологий и их применение во всех сферах управления дают возможность использовать сложные вычислительные алгоритмы, позволяющие повысить гибкость и точность моделирования, хотя при этом в некоторой степени теряется простота и наглядность формул расчета нагрузочных потерь.

В детерминированных методах расчета не учитывается неточность исходных данных при построении графика нагрузки. Для преодоления этого недостатка разработаны методы расчета потерь энергии, основанные на вероятностном представлении графиков электрических нагрузок, которые условно можно разделить на методы с представлением нагрузки как случайной величины и регрессионные методы расчета потерь.

Потери энергии в элементах электрической сети являются функцией характеристик графиков нагрузки. Для расчета нагрузочных потерь в распределительных электрических сетях используется метод средних нагрузок, $\Delta W_{\text{н}} = \Delta P_{\text{ср}} k_{\text{ф}}^2 T$, и метод числа часов наибольших потерь, $\Delta W_{\text{н}} = \Delta P_{\text{max}} \tau$, где $\Delta P_{\text{ср}}$ — потери мощности в сети при средних нагрузках узлов (или сети в целом) за время T ; $k_{\text{ф}}^2$ — квадрат коэффициента формы графика мощности или тока; ΔP_{max} — потери мощности в сети при максимальных нагрузках узлов; τ — число часов максимальных потерь.

Основными показателями графиков нагрузки при расчете потерь являются число часов использования максимума нагрузки T_{max} и коэффициент заполнения графика нагрузки k_3 . Другой важной характеристикой графика нагрузок является отношение минимальной нагрузки к максимальной: $k_{\text{min}} = P_{\text{min}} / P_{\text{max}}$.

Наиболее точные значения τ и $k_{\text{ф}}^2$ можно определить по известному графику нагрузки. Исследования, направленные на получение более точных зависимостей $k_{\text{ф}}^2$ от параметров, характеризующих графики нагрузки, привели к множеству расчетных формул. При неизвестных графиках нагрузки значение $k_{\text{ф}}^2$ можно определить с помощью различных часто используемых эмпирических формул [1].

Приведем наиболее часто используемые в технической литературе формулы расчета $k_{\text{ф}}^2$. Предложенная в [4] формула для практических расчетов потерь электроэнергии в сетях энергосистем имеет вид при $\lambda < 1$

$$k_{\text{ф}}^2 = 1 + \frac{(1 - k_3)^2 (k_3 - k_{\text{min}})}{(2 - k_3 - k_{\text{min}}) k_3^2}, \quad (1)$$

при $\lambda \geq 1$

$$k_{\text{ф}}^2 = 1 + \frac{(1 - k_3)(k_3 - k_{\text{min}})^2}{(1 + k_3 - 2k_{\text{min}}) k_3^2}, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{k_3 - k_{\text{min}}}{1 - k_3}$.

В [1] на основе аппроксимации проведенных вариантных расчетов для всех возможных конфигураций графика нагрузки по продолжительности с

дискретностью 0,1 по обеим осям (t и k_3) получена формула для ожидаемого среднего значения:

$$k_{\Phi}^2 = \frac{1+2k_3}{3k_3}. \quad (3)$$

Погрешность формул (1) и (2) для двух параметров, k_3 и k_{\min} , согласно [1] составляет 10,8 %, а погрешность формулы (3) для одного параметра k_3 — 13 %. В работе [1] предлагается пользоваться формулой (3). Расчеты k_{Φ}^2 обычно выполняются на компьютерах. Поэтому упрощение формулы (3) в современных условиях развития компьютерных технологий за счет даже малой потери точности неоправданно.

Формулы (1)—(3) имеют значительные систематические погрешности, и эти погрешности резко возрастают при уменьшении значения k_3 .

В [2] определены погрешности по известным эмпирическим выражениям для k_{Φ}^2 , а также по формуле (1). Установлено, что применяемые на практике формулы расчета потерь электроэнергии при учете ограничений и перерывов в электроснабжении имеют существенные погрешности. Применяемые на практике формулы для двух параметров, k_3 и k_{\min} , не могут полностью отразить различия графиков нагрузки. Поэтому погрешность определения k_{Φ}^2 по двум параметрам полностью не может быть устранена.

Точность определения k_{Φ}^2 можно увеличить, введя кроме используемых параметров k_3 и k_{\min} , дополнительные параметры, характеризующие графики нагрузки. В качестве дополнительного параметра можно принять продолжительность максимальной и минимальной нагрузок графика и др. Например, продолжительность минимальной нагрузки графика является одним из параметров, характеризующих показатели графика нагрузки. Поскольку общий график нагрузки формируется из суммы типовых графиков, можно получить оценку продолжительности минимальной нагрузки. В [2] в качестве дополнительного параметра принята продолжительность режима с минимальной нагрузкой T_{\min} .

Относительная продолжительность минимальной нагрузки определяется по формуле $k_{t_{\min}} = T_{\min} / T$.

Известно, что чем больше влияющих параметров учитывается при определении k_{Φ}^2 , тем большей точности можно достигнуть при моделировании. Поэтому график нагрузки предлагается характеризовать тремя параметрами: k_3 , k_{\min} и $k_{t_{\min}}$.

Анализ погрешностей формул, применяемых на практике при учете ограничений и перерывов в электроснабжении [2,3], показывает, что известные формулы для $k_3 < 0,5$ имеют недопустимо высокие систематические погрешности.

Эмпирическая формула для определения k_{Φ}^2 . В результате обработки типовых графиков нагрузки на основе формулы (1) получена [5] новая эмпирическая формула для расчета k_{Φ}^2 :

$$k_{\Phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)^2(k_3 - k_{\min})}{(2-k_3 - k_{\min})k_3^2} + \left(\frac{0,5}{k_3}\right)^2 (k_{t \min})^{(1/k_3)}. \quad (4)$$

Для более точного описания k_{Φ}^2 в [2] предложено применение разновидности формулы (4) в зависимости от величины λ . Коэффициенты в формулах [2] были получены по ограниченному числу тестовых графиков нагрузки (всего 24 разновидности).

Формулы вида (4) были использованы для расчета потерь энергии в распределительных сетях АО «Азерэнерджи» на переходном этапе при наличии ограничений и перерывов в электроснабжении отдельных потребителей. Результаты проведенного анализа [2] графиков нагрузки с учетом ограничений и перерывов в электроснабжении свидетельствуют о том, что перерывы в электроснабжении приводят к существенному возрастанию величины T_{\min} . Для реальных графиков нагрузки потребителей при ограничениях и перерывах в электроснабжении значение k_{Φ}^2 увеличивается от трех до шести раз.

Рассмотрим возможность повышения точности моделирования характеристик графиков нагрузки и определения k_{Φ}^2 с применением имитационного моделирования графиков нагрузки и использованием библиотеки эмпирических формул в зависимости от области изменения значений параметров k_3 и k_{\min} .

Имитационное дискретное моделирование возможных конфигураций графика нагрузки по ее продолжительности. Моделирование возможных конфигураций графика нагрузки по продолжительности сводится к эквивалентной задаче имитационного моделирования, комбинации уровней столбцов матрицы $n \times n$ и решению следующей целочисленной системы уравнений с неравенствами.

Формируем уравнение для заданных значений k_3 и k_{\min} в виде равенства

$$I_1 + I_2 + I_3 \dots I_n = n \cdot k_3, \quad (5)$$

где I_n — значение тока или мощности соответствующей n -й ступени графика нагрузки.

Задаем значения первого и n -го столбцов

$$I_1 = n, I_n = n \cdot k_{\min}. \quad (6)$$

Формируем неравенства вида

$$I_2 \leq I_1, I_3 \leq I_2, \dots, I_n \leq I_{n-1}. \quad (7)$$

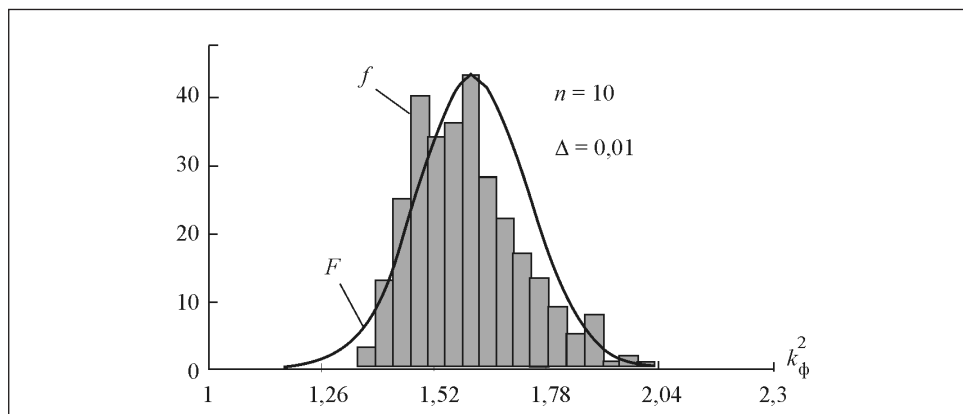


Рис. 1. Гистограмма распределения k_{ϕ}^2 для графиков нагрузки при $k_3 = 0,4$, $k_{\min} = 0,1$

Решив уравнения (5)—(7), находим целочисленные значения переменных $I_2 \dots I_{n-1}$. Поиск всех вариантов для заданных значений k_3 и k_{\min} осуществляем, изменяя значения столбцов (уменьшая на одну единицу) от графика нагрузки, соответствующего максимуму k_{ϕ}^2 , в сторону снижения. При относительной дискретности изменения уровня нагрузки $\Delta_{\Delta T} = 1/n$ и времени продолжительности $\Delta_{\Delta T} = 1/n$ шаг дискретности изменения уровня k_3 имеет значение $\Delta_{\Delta k_3} = 1/n^2$.

В соответствии с алгоритмом (5)—(7) разработана математическая модель и программа для моделирования возможных конфигураций графика нагрузки по продолжительности. На рис. 1 приведены гистограмма распределения k_{ϕ}^2 при $n = 10$, $\Delta = 0,01$ для 340 возможных вариантов графиков нагрузки с параметрами $k_3 = 0,4$, $k_{\min} = 0,1$ и кривая нормального распределения нагрузки F .

Результаты обработки гистограмм распределения k_{ϕ}^2 при различных шагах дискретности показывают, что при выборе шага дискретности, имеющего достаточное число возможных вариантов графиков нагрузки, характеристики распределения k_{ϕ}^2 имеют параметры, близкие к нормальному закону распределения. В случае, представленном на рис. 1, нормальный закон распределения имеет математическое ожидание 1,609 и среднеквадратическое отклонение 0,127.

В табл. 1 приведены средние значения k_{ϕ}^2 для возможных конфигураций графиков нагрузки по продолжительности с дискретностью 0,1 в зависимости от k_3 и k_{\min} . Как видно из табл. 1, использование формул (1)—(3) связано с большими систематическими погрешностями. Анализ результатов дискретного моделирования характеристик графиков нагрузки для

различных значений k_3 в зависимости от k_{\min} свидетельствует о возможности повышения точности в результате получения соответствующих адекватных зависимостей и формул.

С помощью формулы (3), полученной усреднением коэффициента k_{Φ}^2 всех возможных вариантов графиков нагрузки, невозможно полностью устранить погрешности. Например, при $k_{\min} = 0,1$ формулы (1)—(3) имеют отрицательные погрешности. При $k_{\min} = 0,2$ и $k_{\min} = 0,3$ формулы (1), (2) имеют отрицательные погрешности, а формула (3) — положительные.

Таблица 1

Результаты моделирования графиков нагрузки			Результаты расчета по формулам		Погрешность формул, %	
k_3	Число вариантов	k_{Φ}^2	(1), (2)	(3)	(1), (2)	(3)
При $k_{\min} = 0,1$						
0,4	340	1,58	1,45	1,50	-8,32	-5,16
0,39	298	1,60	1,47	1,52	-8,36	-5,14
0,38	253	1,63	1,49	1,54	-8,59	-5,31
0,37	218	1,66	1,51	1,57	-8,81	-5,44
0,36	186	1,68	1,53	1,59	-8,8	-5,29
0,35	155	1,71	1,56	1,62	-8,94	-5,27
0,34	127	1,75	1,58	1,65	-9,53	-5,68
0,33	104	1,78	1,60	1,68	-9,9	-5,80
0,32	82	1,82	1,63	1,71	-10,47	-6,1
0,31	66	1,86	1,65	1,74	-11,02	-6,31
0,3	50	1,91	1,68	1,78	-11,8	-6,69
0,29	39	1,95	1,71	1,82	-12,54	-6,97
0,28	29	2,02	1,74	1,86	-13,96	-7,89
При $k_{\min} = 0,2$						
0,4	71	1,41	1,32	1,50	-6,4	6,25
0,39	52	1,43	1,33	1,52	-6,93	6,48
0,38	40	1,45	1,34	1,54	-7,64	6,62
0,37	28	1,47	1,35	1,57	-8,55	6,61
0,36	22	1,49	1,35	1,59	-9,44	6,74

При $k_3 = 0,4$ и $k_{\min} = 0,1$ формулы (1), (2) имеют систематические погрешности до $-35,2\%$, а формула (3) — до $-19,82\%$.

Использование дискретного моделирования при $k_{\min} \geq 0,1$ с ограниченным шагом $\Delta_{\Delta} = 0,1$ приводит к методической погрешности моделирования. Для предварительной сравнительной оценки погрешности построена гистограмма распределения k_{ϕ}^2 . Например, если при $k_3 = 0,19$ и $k_{\min} = 0,1$, шаге дискретности $\Delta_{\Delta} = 0,1$ и времени продолжительности $\Delta_{\Delta T} = 0,1$ имеется один возможный вариант — $k_{\phi}^2 = 3,02$, то при $k_{\min} = 0,1$ и шаге дискретности $\Delta_{\Delta} = 0,05$, $\Delta_{\Delta T} = 0,05$, $n = 400$ (шаг дискретности изменения уровня k_3 — $\Delta_{\Delta k_3} = 0,0025$) имеется более 300 вариантов со средним значением $k_{\phi}^2 = 2,22$. Следовательно, среднее значение, определенное при шаге дискретности 0,1, в данном случае имеет погрешность 36 %.

Для обеспечения адекватности при дискретном имитационном моделировании возникает задача выбора рационального шага дискретности в зависимости от значений k_3 и k_{\min} . Например для графиков нагрузки при $k_3 < 0,3$ принятие шага дискретности 0,1 является неадекватным относительно числа вариантов графиков исходя из условий соответствия нормальному закону распределения.

Уменьшение шага дискретности повышает точность моделирования. Однако при этом резко возрастает число возможных вариантов графиков нагрузки. В связи с этим предлагается использовать упрощенный алгоритм моделирования, который основан на предположении о распределении k_{ϕ}^2 возможных графиков нагрузки по нормальному закону.

Дискретное имитационное моделирование графиков электрических нагрузок по продолжительности с выбором шага дискретности в зависимости от k_3 и k_{\min} и получение библиотеки аппроксимированных зависимостей позволяет повысить точность моделирования технических потерь энергии в распределительных электрических сетях.

Графики нагрузки по продолжительности являются плавно изменяющимися. Использование полного дискретного моделирования приводит к методической погрешности и достаточно большим затратам времени на моделирование. Поэтому рассмотрим имитационное моделирование графиков нагрузки аналитическими функциями, которое имеет определенные преимущества по размерности решаемых задач, быстрдействию и наглядности, а также позволяет объяснить причины систематической погрешности формул (1), (2) и обеспечить их устранение.

Методика определения k_{ϕ}^2 с помощью имитационного моделирования графиков нагрузки аналитическими зависимостями во времени. Потери энергии в элементах электрической сети являются функцией характеристик графиков нагрузки. Графики нагрузки по продолжитель-

ности могут быть выражены разными функциями: 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 др. [5].

Формулы (1), (2) получены аппроксимацией графиков нагрузки по продолжительности следующими аналитическими зависимостями во времени: при $\lambda > 1$

$$I = I_{\max} - (I_{\max} - I_{\min})(t/T)^\lambda, \quad (8)$$

при $\lambda \leq 1$

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min})(1-t/T)^{1/\lambda}, \quad (9)$$

где I_{\max} , I_{\min} — значения максимальных и минимальных токов за расчетный период времени T . Вспомогательный коэффициент λ определяется по следующей формуле:

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

При выводе формул (1), (2) приняты следующие допущения [4]: график нагрузки как случайная величина имеет β -распределение; графики нагрузки по продолжительности представляются аналитическими зависимостями во времени вида (8) и (9). С учетом того что аналитические зависимости (8) и (9) интегрируемы, получены параметры β -распределения и соответственно формулы (1), (2).

Аппроксимация графиков нагрузки аналитическими зависимостями вида (8), (9) хотя и значительно повышает точность моделирования потерь энергии, однако полностью не устраняет систематические погрешности [1]. В связи с этим в работах [2, 3] предприняты попытки получения эмпирических зависимостей, устраняющих эти недостатки. В [3] рассмотрен выбор вида аппроксимирующих функций графиков нагрузки с помощью различных аналитических зависимостей.

Рассмотрим получение эмпирических зависимостей для k_Φ^2 аппроксимацией графиков нагрузки экспоненциальными зависимостями вида

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) e^{-(\alpha_2 t)^\rho}, \quad (10)$$

где α и ρ — параметры масштаба, определяемые в результате аппроксимации.

Повышение точности моделирования потерь энергии и снижение систематических погрешностей можно обеспечить подбором вида аппроксимирующей зависимости (ρ и α) графика нагрузки. Моделирование графиков нагрузки подбором значений ρ и α в (10) позволяет получить семейство графиков, близких к реальным (рис. 2).

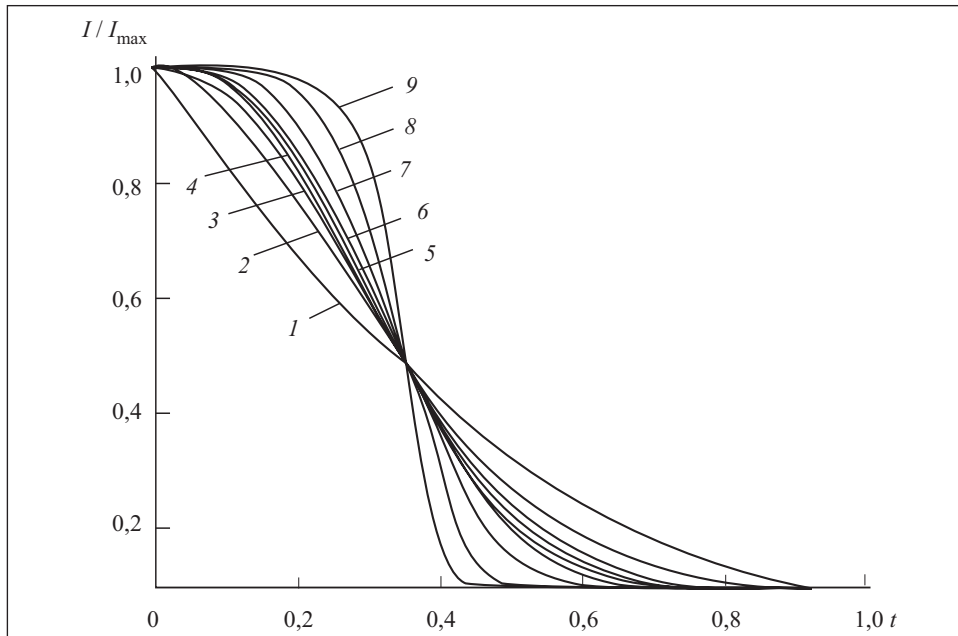


Рис. 2. Графики нагрузки ($k_3 = 0,4$; $I_{\min} = 0,1$; $\lambda = 0,5$), рассчитанные по формуле (9) (кривая 1) и по формуле (10) (кривые 2—9) при различных значениях ρ и α : 2 — $\rho = 2,1$, $\alpha = 8,15$; 3 — $\rho = 2,375$, $\alpha = 10,2$; 4 — $\rho = 2,55$, $\alpha = 12,2$; 5 — $\rho = 2,69$, $\alpha = 14$; 6 — $\rho = 3,04$, $\alpha = 20$; 7 — $\rho = 3,4$, $\alpha = 30$; 8 — $\rho = 5$, $\alpha = 158$; 9 — $\rho = 8$, $\alpha = 4000$

Постановка задачи моделирования характеристик графиков нагрузки по продолжительности. Определим параметры α и ρ аппроксимацией графиков нагрузки зависимостями вида (10), которые являются также неявными функциями параметров графика нагрузки k_3 , k_{\min} и $k_{t\min}$:

$$k_3 = \int_0^1 (I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) e^{-(\alpha t)^\rho}) dt. \quad (11)$$

Дисперсия для заданного графика нагрузки определяется выражением

$$D_i = \int_0^1 (I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) e^{-(\alpha t)^\rho})^2 dt - k_3^2. \quad (12)$$

Для вычисления интегралов (11) и (12) используем численные методы интегрирования, в частности метод Симпсона. В общем случае графики нагрузки при $k_3 = \text{const}$ имеют множество решений для α_i , ρ_i и различные дисперсии.

Подбор коэффициентов α_i и ρ_i , обеспечивающий множество решений, выполняется решением задачи минимизации функции

$$\left[\int_0^1 I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) e^{-(\alpha t)^{\rho}} dt - k_3 \right]^2 = 0 \quad (13)$$

с учетом ограничений $0 \leq k_{\min} < 1$, $0 \leq k_{t\min} < 1$.

Поскольку непосредственное интегрирование выражений (11), (12) не представляется возможным, требуется применение численных методов.

При задании ρ минимизация (13) осуществляется подбором значения α , обеспечивающего заданное значение k_3 по (11). В случае, когда для заданного ρ не удастся обеспечить соответствующее значение k_3 , то изменением значения ρ (увеличением) добиваются получения множества решений для ρ_i и α_i .

Интервалы изменения α и ρ зависят от формы графика нагрузки с параметрами k_3 и k_{\min} . Моделирование графика нагрузки, соответствующее заданным значениям параметров k_3 и k_{\min} , не всегда удастся обеспечить. Например, параметр $\alpha < 2$ часто не обеспечивает заданных значений k_3 , k_{\min} и $k_{t\min}$ выбором значения α .

Для обеспечения адекватной аппроксимации (10), удовлетворяющей условию (11), в качестве предварительного критерия завершения подбора параметров по точности предлагается использовать условие

$$(I_{\max} - I_{\min}) e^{-(\alpha t)^{\rho_i}} \leq \varepsilon_{k_3}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{k_3} = 0,0005$. Если условие (14) выполняется, то можно считать, что (10) обеспечивает аппроксимацию, имеющую приемлемую погрешность.

Время начала минимальной нагрузки графика в программе определяется из условия

$$(I_{\max} - I_{\min}) e^{-(\alpha t)^{\rho_i}} - k_{t\min} \leq \varepsilon_{k_{t\min}}. \quad (15)$$

Условие точности поиска $k_{t\min}$ предлагается принимать в пределах $\varepsilon_{k_{t\min}} = 0,001 \div 0,01$.

Имитационное моделирование семейства графиков нагрузки для определения интервалов изменения коэффициента формы. Моделирование предельных графиков нагрузки осуществляется при условии получения наименьших и наибольших значений k_{ϕ}^2 . Методика моделирования графика нагрузки (10) с учетом (11) сводится к задаче поиска параметров α и ρ из условия минимума левой части (13). Для этой цели используется

квадратичная интерполяция функции (13) для значений α при заданном ρ в трех различных точках :

$$f(\alpha) = a + b\alpha + \alpha^2. \quad (16)$$

Алгоритм имитационного моделирования графиков нагрузки основан на итерационном методе покоординатного спуска и методе квадратичной интерполяции. Для поиска минимума функции использован метод квадратичной интерполяции.

Разработана программа имитационного моделирования графиков нагрузки. Исходными вводимыми данными являются: коэффициенты k_3 и k_{\min} , а также коэффициент $k_{t\min}$, определяемый как отношение продолжительности минимальной нагрузки к продолжительности расчетного периода.

Имитационное моделирование семейства графиков нагрузки осуществляется заданием параметров $k_3, k_{\min}, k_{t\min}$, при этом определяются α и $k_{t\min}$. Предусмотрено задание нижних и верхних пределов изменения значения ρ и шага изменения $\Delta\rho$. Обычно за 10—40 итераций удается получить практически приемлемые точности аппроксимации для одного графика нагрузки при помощи квадратичной интерполяции.

Рекомендуемые значения α и ρ в зависимости от формы графика нагрузки. Для аппроксимации графиков нагрузки функцией вида (10) по продолжительности в зависимости от k_3 при заданных значениях k_3 и k_{\min} и относительном возрастании ρ увеличивается дисперсия и значение α . При $\alpha = \text{const}$ и увеличении ρ значение k_3 уменьшается. При увеличении α и ρ дисперсия возрастает. Для получения относительно больших значений k_3 необходимо задавать относительно большие значения ρ . Для получения кривых с большими продолжительностями минимальной и максимальной нагрузки необходимо увеличить значение α . Интервалы изменения дисперсии для графиков нагрузки с заданным значением k_3 определяются заданием значения $1 \leq \rho \leq 20$ и шага изменения $\Delta\rho$ $0,1 \leq \Delta\rho \leq 1$, а также выбором значения α , соответствующего заданным параметрам k_3 и k_{\min} . Обычно для нормальных графиков нагрузки значение α изменяется в пределах $1,5 < \alpha < 8$. На рис. 3 приведена экранная форма ввода и вывода результатов расчета программы имитационного моделирования графиков нагрузки.

В табл. 2 приведены результаты имитационного моделирования графиков электрических нагрузок по продолжительности $k_{\text{ср.п}}^2$ по алгоритмам (5)—(7) и (10)—(15) при $k_{\min} = 0,1$ и $\rho = 2$.

Зависимости интервалов изменения k_{ϕ}^2 , полученные имитационным моделированием графиков нагрузки от k_3, k_{\min} и $k_{t\min}$ по алгоритму (10)—(15) приведены на рис. 4. Предлагаемый метод имитационного моделирования графиков электрических нагрузок экспоненциальными зависимостями

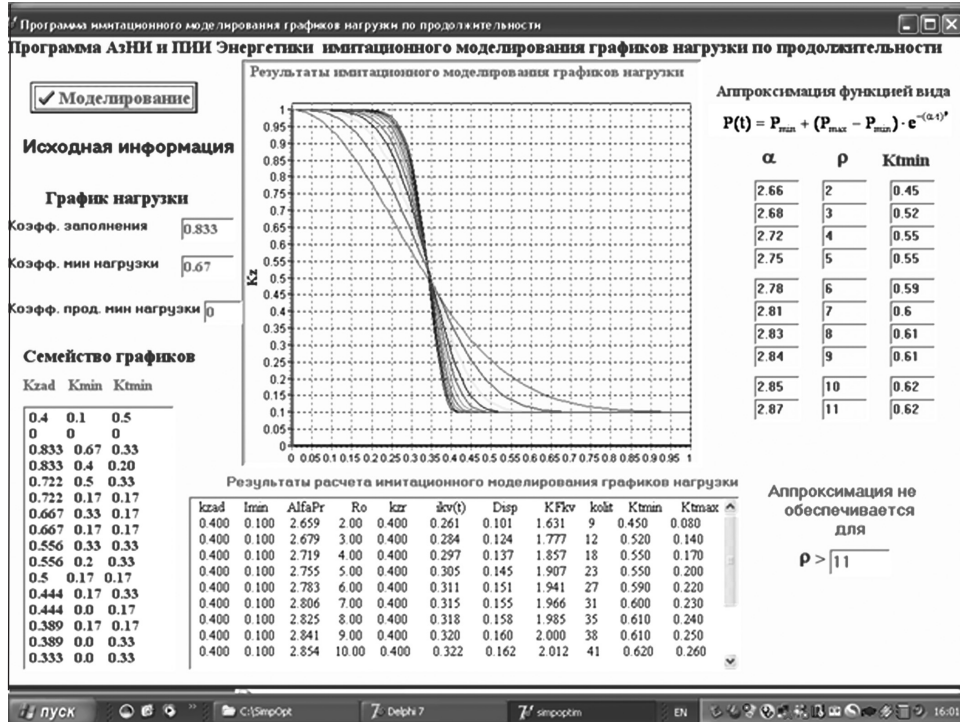


Рис. 3. Экранная форма программы имитационного моделирования графиков нагрузки

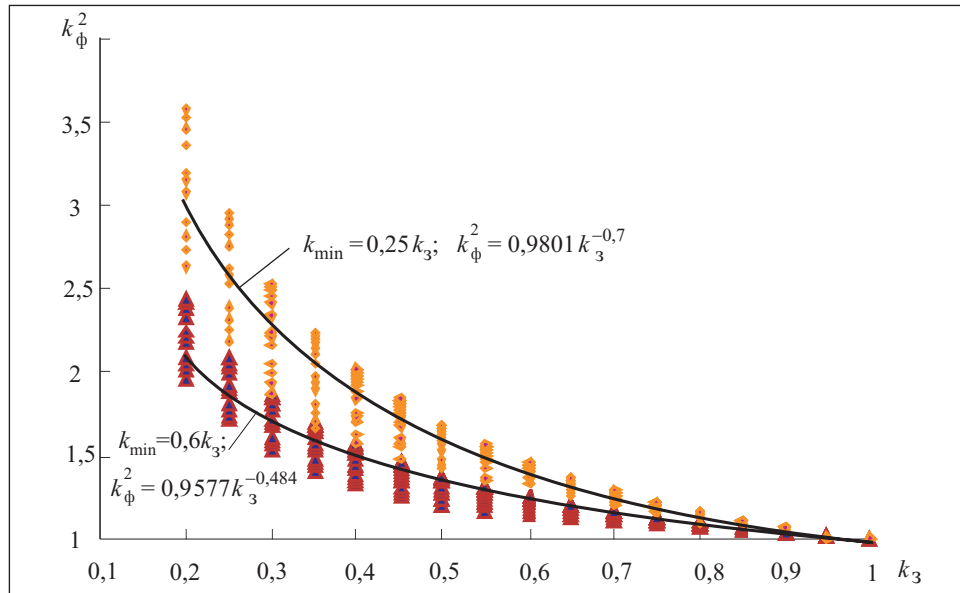


Рис. 4. Кривые изменения k_{ϕ}^2 в зависимости от значения k_3 для возможных графиков нагрузки

Таблица 2

k_3	Модель (10)—(15)		Дискретное моделирование	Погрешность модели (5)—(7), %
	α	$k_{\phi,п}^2$	$k_{\phi,д}^2$	$(k_{\phi,д}^2 - k_{\phi,п}^2) 100 \backslash k_{\phi,п}^2$
0,25	5,317	2,167	2,198	1,43
0,30	3,988	1,970	1,905	-3,30
0,35	3,190	1,789	1,709	-4,47
0,40	2,658	1,631	1,582	-3,00

тиями вида (10) отличается от известных тем, что основан на использовании наиболее реальных графиков нагрузки, повышает точность моделирования k_{ϕ}^2 и сводит к минимуму трудозатраты по определению интервалов потерь энергии. Как видно из рис. 4, при одних и тех же значениях k_{\min} значения k_{ϕ}^2 изменяются в широких пределах, например для $k_3 = 0,4$ $k_{\phi}^2 = 1,26 \div 2,0$.

При сопоставлении значений k_{ϕ}^2 семейства графиков нагрузки по продолжительности, представленных в виде степенной функции (9) и выражением (10), видно, что в зависимости от t_{\max} коэффициенты аппроксимации α и ρ графиков нагрузки принимают различные значения. Величина k_{ϕ}^2 изменяется в пределах от 1,631 до 1,856. Аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида (9), по сравнению с (10) и (11)—(15), имеет отрицательные погрешности от 12 до 28 % при $k_3 = 0,4$.

Возрастание систематической погрешности формулы (1) для $k_3 < 0,5$ объясняется использованием для аппроксимации графиков нагрузки зависимости вида (9), которая в данном случае имеет форму графика с практически нулевой продолжительностью максимума нагрузки.

Метод имитационного моделирования графиков электрических нагрузок по алгоритму (10)—(15) отличается более гибким моделированием k_{ϕ}^2 , удовлетворяющим дополнительные желаемые параметры: продолжительность минимальной или максимальной нагрузки. Имитационное моделирование графиков нагрузки непрерывной функцией вида (10) позволяет непосредственно без моделирования всех возможных графиков нагрузки получить среднее значение k_{ϕ}^2 и предельные значения, что значительно упрощает и ускоряет процесс получения характеристики графиков нагрузки.

Выводы. 1. Известные упрощенные алгоритмы и эмпирические формулы расчета k_{ϕ}^2 при малых значениях k_3 имеют большие систематические погрешности.

2. Дискретное имитационное моделирование возможных графиков электрических нагрузок по продолжительности позволяет оценить погрешности моделирования k_{ϕ}^2 и технических потерь энергии в распределительных электрических сетях.

3. Предлагаемая методика определения переменных потерь при имитационном моделировании графиков электрических нагрузок по продолжительности в виде непрерывной функции позволяет повысить точность и гибкость моделирования k_{ϕ}^2 и потерь энергии в распределительных электрических сетях.

The procedure, algorithms and program have been developed for estimation of the error in determining the square of the form factor at small values of the coefficient of filling by simulation modeling of the electric load curves by duration in a form of a continuous function that allows increasing the accuracy of electric energy loss calculation in distribution networks.

1. Железко Ю. С., Савченко О. В. Определение интегральных характеристик графиков нагрузки для расчета потерь электроэнергии в электрических сетях//Электрические станции. — 2001. — № 10. — С. 9—13.
2. 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.
3. Баламетов А. Б. Методы расчета потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем. — Баку : Элм, 2006. — 337 с.
4. Анисимов Л. П., Левин Л. С., Пекелис В. Г. Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях// Электричество. — 1975. — № 4. — С. 27—30.
5. Клебанов Л. Д. Вопросы методики определения и снижения потерь электрической энергии в сетях. —Л : Изд-во ЛГУ, 1973. — 72 с.

Поступила 17.05.10

БАЛАМЕТОВ Аиураф Баламет оглу, д-р техн. наук, руководитель лаборатории Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики (г. Баку). В 1971 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — установившиеся режимы электроэнергетических систем.

ХАЛИЛОВ Эльман Дамир оглы, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики. В 1984 г. окончил Азербайджанский государственный университет. Область научных исследований — математическое моделирование в ЭЭС.

АЛИЕВ Хагани Тапдыг оглы, диссертант Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики. В 1983 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование потерь электроэнергии в электрических сетях.

БАХЫШОВ Эльман Джаванишир оглы, аспирант Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики. В 2002 г. окончил Азербайджанскую нефтяную академию. В 2005 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — потери электроэнергии, компенсация реактивной мощности в электрических сетях.

