

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ ПРИ РАСЧЕТАХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Докт. техн. наук БАЛАМЕТОВ А. Б., инж. МАМЕДОВ С. Г.

*Азербайджанский научно-исследовательский институт  
энергетики и энергетического проектирования*

Известные методики расчета потерь электроэнергии в электрических сетях основаны на нормальных условиях эксплуатации и функционирования электроэнергетической системы и бесперебойном электроснабжении потребителей. При электроснабжении потребителей с ограничениями и перерывами известные выражения для определения числа часов наибольших потерь и коэффициента формы графика нагрузки имеют недопустимо высокие погрешности, и их применение становится неоправданным. В данной статье рассматриваются вопросы получения зависимости для коэффициента формы графиков нагрузки с учетом ограничений и перерывов в электроснабжении.

Для расчета нагрузочных потерь в распределительных электрических сетях применяются метод средних нагрузок, использующий формулу

$$\Delta W_H = \Delta P_{\text{cp}} k_{\text{ф}}^2 T,$$

и метод числа часов наибольших потерь

$$\Delta W_H = \Delta P_{\text{max}} \tau,$$

где  $\Delta P_{\text{cp}}$  – потери мощности в сети при средних нагрузках узлов (или сети в целом) за время  $T$ ;  $k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы графика мощности или тока;  $\Delta P_{\text{max}}$  – потери мощности в сети при максимальных нагрузках узлов;  $\tau$  – число часов максимальных потерь.

В последнее время в отдельных электрических сетях наблюдаются перерывы в электроснабжении потребителей. При этом часть потребителей снабжается электроэнергией постоянно, а часть – с длительными перерывами.

Основными показателями графиков нагрузки при расчете потерь являются: число часов использования максимума нагрузки  $T_{\text{max}}$ , коэффициент заполнения графика нагрузки

$$k_3 = \frac{N_{\text{cp}}}{N_{\text{max}}}.$$

Здесь  $N_{\text{cp}}$  и  $N_{\text{max}}$  – среднее и максимальное значения графика нагрузки. В качестве  $N$  может рассматриваться любая из величин  $P$ ,  $Q$  или  $I$ . Другой важной характеристикой графика нагрузок является отношение минимальной нагрузки к максимальной:

$$k_{\min} = \frac{N_{\min}}{N_{\max}}.$$

При расчетах потерь электроэнергии форму графика нагрузки характеризуют числом часов наибольших потерь  $\tau$  и коэффициентом формы графика мощности  $k_{\phi}$ , которые определяются:

$$\tau = \frac{M[N^2]T}{N_{\max}}; \quad k_{\phi}^2 = \frac{M[N^2]}{M^2[N]}, \quad (1)$$

где  $M$  – символ математического ожидания.

Наиболее точные значения  $\tau$  и  $k_{\phi}$  можно определить по известному графику нагрузки. Исследования, направленные на получение более точных зависимостей  $\tau$  и  $k_{\phi}$  от параметров, характеризующих графики нагрузки, привели к множеству расчетных формул. При неизвестных графиках нагрузки значения  $\tau$  и  $k_{\phi}$  можно рассчитать с помощью различных эмпирических часто используемых формул [1–9]. Такими в технической литературе являются следующие:

формула В. В. Кезевича [3], полученная простой заменой в формуле А. М. Залесского:

$$\tau = (0,124 + 0,876 k_3)^2 \cdot 8760; \quad (2)$$

формула «Энергосетьпроекта» [4]

$$\tau = \left[ 2k_3 - 1 + \frac{(1-k_3)(1-k_{\min})^2}{1+k_3-2k_{\min}} \right] \cdot 8760. \quad (3)$$

Для практических расчетов потерь в сетях энергосистем было предложено использовать формулу Л. П. Анисимова, М. С. Левина и В. Г. Пекелеса [5]:

$$k_{\phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)^2(k_3 - k_{\min})}{(2-k_3 - k_{\min})k_3^2} \quad \text{при } \lambda < 1; \quad (4)$$

$$k_{\phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)(k_3 - k_{\min})^2}{(1+k_3 - 2k_{\min})k_3^2} \quad \text{при } \lambda \geq 1,$$

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

Формула В. Н. Казанцева [2]

$$k_{\phi}^2 = 1 + \frac{3(1-k_{\min})^2}{4(1+k_{\min})^2}. \quad (5)$$

Из (1) можно получить зависимость между  $\tau$  и  $k_\phi$  [6]

$$\tau = k_3^2 k_\phi^2 \cdot 8760.$$

Формула (2) является наиболее точной для реальных графиков нагрузки из всех известных эмпирических зависимостей. Погрешности  $\delta$  таких зависимостей определения  $\tau$  и  $k_\phi$  можно найти в [3–6]. Среднеквадратичные погрешности использования известных формул при нормальных условиях эксплуатации электрических сетей составляли 3,5...12,0 % [7].

В [7] подробно рассмотрены различные эмпирические формулы и приведены погрешности определения  $\tau$  от  $k_3$  и  $k_{\min}$ , из которых видно, что максимальные погрешности могут достигать от –80 до 135 %, причем с уменьшением значения коэффициентов  $k_3$  и  $k_{\min}$  они продолжают возрастать.

В [7] отмечается, что любая формула для расчета  $\tau$  и  $k_\phi$ , базирующаяся на учете только  $k_3$  и  $k_{\min}$ , не может считаться лучше или хуже другой.

В [8] показано, что даже введение дополнительного параметра  $k_{\min}$  не может в полной мере отразить влияние  $k_\phi$ , так как одному и тому же значению  $k_{\min}$  соответствует широкий диапазон значений  $k_\phi$ .

Формулы, использующие два параметра  $k_3$  и  $k_{\min}$ , не могут полностью воспроизвести различия графиков нагрузки. С другой стороны, только эти параметры известны при отсутствии графика. Поэтому погрешность в определении  $\tau$  и  $k_\phi$  через  $k_3$  и  $k_{\min}$  полностью не может быть устранена. Величина этой погрешности растет для графиков, отличных от типовых.

Для анализа погрешности в определении  $k_\phi^2$  для графиков мощности с учетом перерывов в электроснабжении были произведены сравнительные расчеты значений  $\tau$  и  $k_\phi$  для возможных конфигураций графиков мощности (рис. 1) с учетом длительностей перерывов в электроснабжении 4, 8, 12, 16 и 20 часов за сутки. Параметры, характеризующие график нагрузки, для реальных графиков при бесперебойном электроснабжении потребителей:  $k_{\min} = 0,2 \dots 0,6$ ;  $k_3 > k_{\min} + 0,2$ ;  $k_3 \leq k_{\min} + 0,4$  и  $T_{\min} = 4 \dots 8$  часов. Ожидаемые диапазоны изменения параметров графика при электроснабжении потребителей с ограничениями и перерывами при продолжительности перерыва за сутки 0...20 часов и  $k_{\min} = 0 \dots 0,2$ ;  $k_3 > 0,167$ ;  $k_3 \leq k_{\min} + 0,2$ . При этом величины, характеризующие график мощности, меняются в пределах  $k_3 = 0,167 \dots 0,722$ ;  $k_{\min} = 0 \dots 0,33$ ;  $T_{\min} = 0 \dots 20$ .

Определены погрешности для графиков (рис. 1) по (2)–(5), зависимости которых от  $k_3$  приведены на рис. 2.

Установлено, что применяемые в практике расчета потерь электроэнергии формулы при учете ограничений и перерывов в электроснабжении имеют погрешности, достигающие 250 %.

Используемые в практике зависимости по оценке  $\tau$  и  $k_\phi$  сыграли существенную роль в развитии теории определения потерь энергии в электрических сетях. Однако их использование в условиях эксплуатации с учетом ограничений и перерывов в электроснабжении нежелательно, так как погрешности при оценке потерь с помощью этих зависимостей недопустимо высокие.

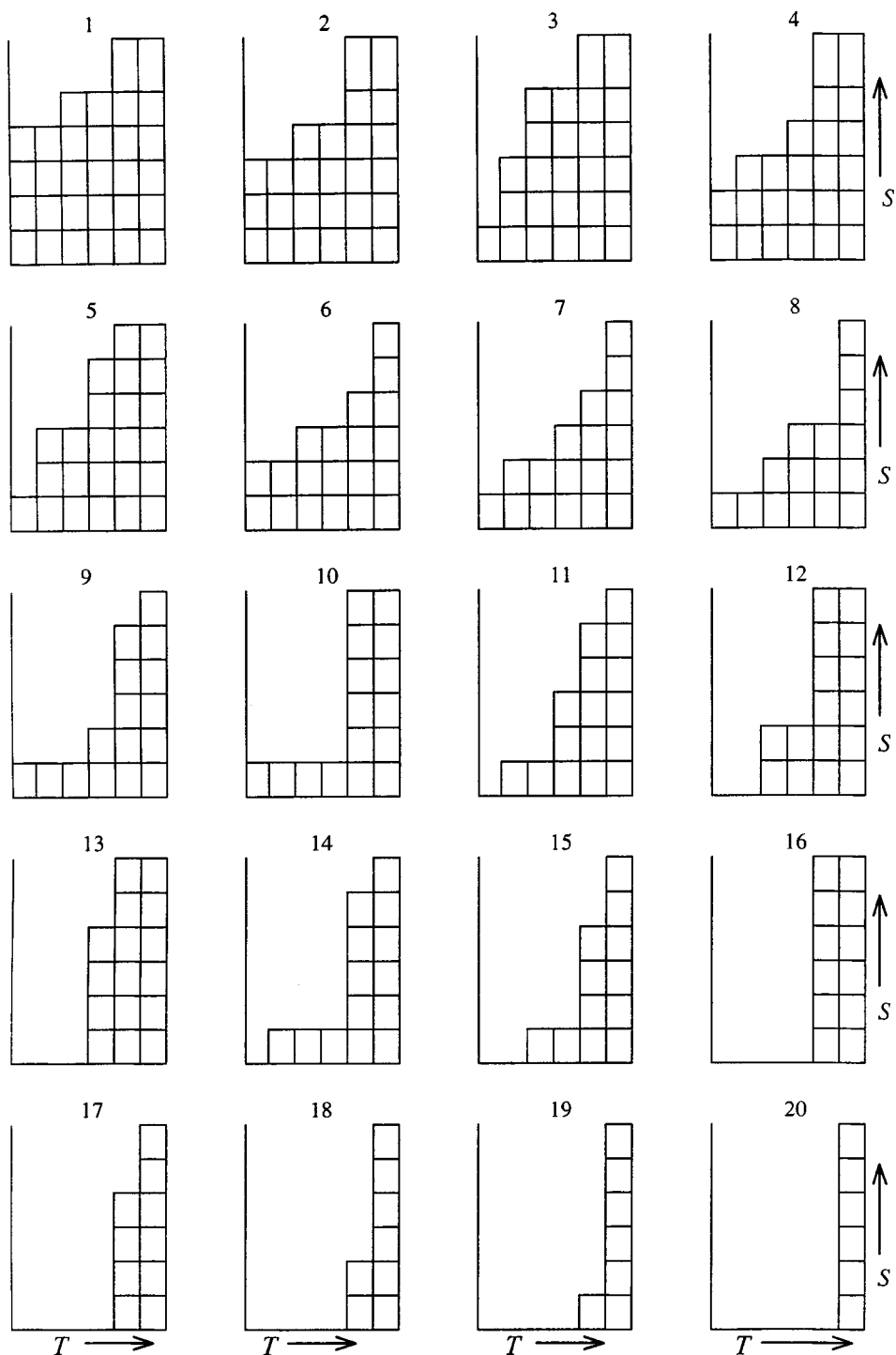


Рис. 1. Графики мощности с разными коэффициентами заполнения, минимальной нагрузкой, ограничениями и перерывами в электроснабжении

Определение значений  $\tau$  и  $k_{\phi}$ , зависящих от характера графика нагрузки, изучено недостаточно. В настоящей статье ставится задача дальнейшего исследования получения более точных зависимостей  $\tau$  и  $k_{\phi}$  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:

$$k_{\min} = \frac{T_{\min}}{T}. \quad (6)$$

Таким образом, график нагрузки предлагается характеризовать тремя параметрами  $k_3$ ,  $k_{\min}$  и  $k_{\min}$ .

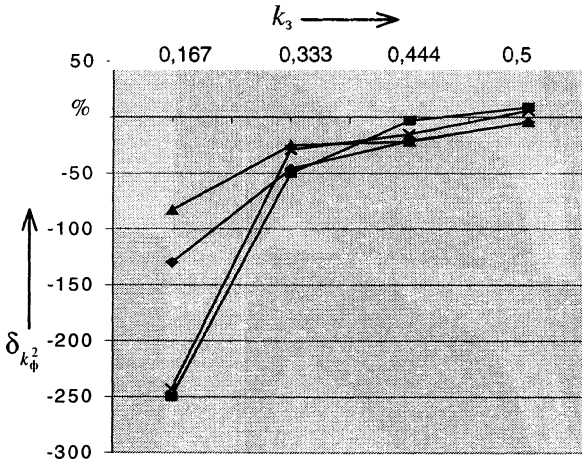


Рис. 2. Зависимости погрешностей определения  $k_{\phi}^2$  по (2)–(5) от  $k_3$ : —♦— — формула Кезевича; —■— — «Энергосетьпроект»; —▲— — Анисимова и др.; —×— — Казанцева

Анализ погрешностей применяемых в практике формул при учете ограничений и перерывов в электроснабжении [3] показывает, что они имеют систематический характер. Наиболее приемлемой из них является (4), поэтому на ее базе получена новая формула для расчета  $k_{\phi}^2$

$$k_{\phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)^2(k_3-k_{\min})}{(2-k_3-k_{\min})k_3^2} + \left(\frac{0,5}{k_3}\right)^2 (k_{\min}) \left(\frac{1}{k_3}\right). \quad (7)$$

Для более точного описания  $k_{\phi}^2$  предлагается применение следующих формул в зависимости от величины  $\lambda$ :

$$k_{\phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)^2(k_3-k_{\min})}{(1+k_3-k_{\min})k_3^2} + \left(\frac{k_{\min}}{k_3}\right)^2 \quad \text{при } \lambda \geq 1; \quad (8)$$

$$k_{\phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)^2(k_3-k_{\min})}{(2-k_3-k_{\min})k_3^2} + 0,25 \left(\frac{k_{\min}}{k_3}\right)^2 \quad \text{при } 0,4 \leq \lambda < 1; \quad (9)$$

$$k_{\Phi}^2 = 1 + \frac{(1-k_3)^2(k_3 - k_{\min})}{(2-k_3 - k_{\min})k_3^2} + \left(\frac{0,5}{k_3}\right)^2 (k_{\min}) \left(\frac{1}{k_1}\right) \text{ при } \lambda < 0,4. \quad (10)$$

Для повышения точности (9), (10) при  $k_{\min} < 0,1$  добавляется составляющая  $0,5k_3$ .

На рис. 3 приведены зависимости погрешностей определения  $k_{\Phi}^2$  по (4) и предлагаемым (7)–(10) от  $k_3$ ,  $k_{\min}$  и  $T_{\min}$ .

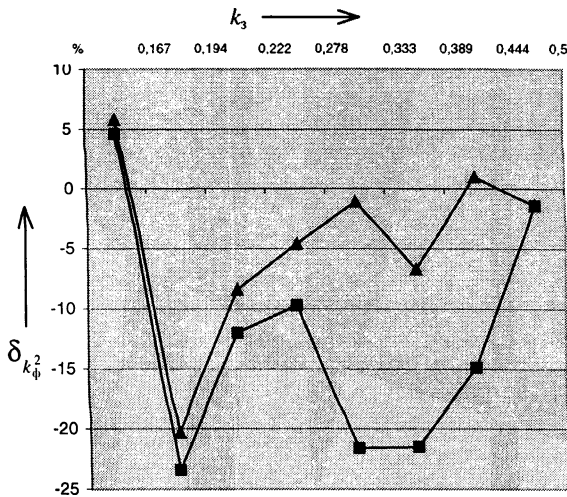


Рис. 3. Зависимости погрешностей определения  $k_{\Phi}^2$  по (4), (7)–(10) от  $k_3$ :

—■— — формула (7); —▲— — (8)–(10)

Расчет погрешности в определении  $k_{\Phi}^2$  производится по выражению

$$\delta_{k_{\Phi}^2} = \frac{k_{\Phi(4)-(8)}^2 - k_{\Phi(1)}^2}{k_{\Phi(4)-(8)}^2} \cdot 100.$$

Формула (4) имеет наибольшие погрешности, когда нагрузка части времени неизменна и максимальна, а другая часть времени суток равна нулю. В частности, при  $T_{\min} = 12$ ,  $k_3 = 0,5$  и  $P_{\min} = 0$  погрешность (4) составляет 50 %, при  $T_{\min} = 8$ ,  $k_3 = 0,333$  и  $P_{\min} = 0$  (график 16, рис. 1) погрешность (4) равна 66,7 %, при  $T_{\min} = 4$ ,  $k_3 = 0,167$  и  $P_{\min} = 0$  (график 20, рис. 1) погрешность (4) – 83,3 %.

Результаты расчетов по (7)–(10) и сравнительный анализ их точности с (4) приведены в табл. 1.

Результаты расчетов (табл. 1) показывают, что (7)–(10) являются более точными как для реальных типовых графиков нагрузки, так и графиков с ограничениями и перерывами в электроснабжении. Максимальная погрешность предлагаемых формул составляет менее 20 %, это соответствует графику нагрузки 19 (рис. 1) с перерывом в электроснабжении 20 часов за сутки, что на практике маловероятно и связано с неточностью задания  $T_{\min}$ .

Для расчета коэффициента формы используются величины  $N_{\max}$ ,  $N_{\min}$ ,  $T_{\min}$ , достоверность определения которых в общем случае невысока. Это

обычно не приводит к заметному снижению точности результатов. Зависимость коэффициента формы от  $N_{\max}$ ,  $N_{\min}$  такова, что погрешности в их определении не оказывают существенного влияния на точность нахождения потерь. При ошибках в расчете  $N_{\max}$ ,  $N_{\min}$ , достигающих 25 %, погрешность в определении потерь не превышает 10 % [1]. В практических расчетах указанные величины находятся с меньшими ошибками [1].

Таблица 1

| $k_3$ | $k_{\min}$ | $k_{\min}$ | $k_{\phi}^2$ по (1) | Результаты определения     |          | Погрешность определения       |          |
|-------|------------|------------|---------------------|----------------------------|----------|-------------------------------|----------|
|       |            |            |                     | $k_{\phi}^2$ по выражениям |          | $k_{\phi}^2$ по выражениям, % |          |
|       |            |            |                     | (2)                        | (7)–(10) | (2)                           | (7)–(10) |
| 0,833 | 0,67       | 0,33       | 1,03                | 1,01                       | 1,05     | -1,3                          | 2,5      |
| 0,722 | 0,5        | 0,33       | 1,08                | 1,04                       | 1,10     | -3,9                          | 1,2      |
| 0,722 | 0,17       | 0,17       | 1,17                | 1,12                       | 1,17     | -4,8                          | 0,0      |
| 0,667 | 0,33       | 0,17       | 1,15                | 1,08                       | 1,15     | -5,8                          | 0,0      |
| 0,667 | 0,17       | 0,17       | 1,21                | 1,14                       | 1,20     | -5,9                          | -0,4     |
| 0,556 | 0,33       | 0,33       | 1,17                | 1,13                       | 1,22     | -3,7                          | 3,9      |
| 0,500 | 0,17       | 0,17       | 1,30                | 1,25                       | 1,28     | -3,7                          | -1,4     |
| 0,444 | 0,17       | 0,33       | 1,41                | 1,31                       | 1,45     | -7,1                          | 3,2      |
| 0,444 | 0,17       | 0,50       | 1,59                | 1,31                       | 1,63     | -21,4                         | 2,2      |
| 0,444 | 0,17       | 0,67       | 1,78                | 1,31                       | 1,88     | -35,7                         | 5,0      |
| 0,444 | 0          | 0,17       | 1,69                | 1,45                       | 1,70     | -16,7                         | 1,0      |
| 0,444 | 0          | 0,33       | 1,87                | 1,45                       | 1,81     | -29,6                         | -3,6     |
| 0,444 | 0          | 0,50       | 2,06                | 1,45                       | 1,99     | -42,6                         | -3,9     |
| 0,389 | 0,17       | 0,17       | 1,96                | 1,38                       | 1,84     | -22,8                         | -6,7     |
| 0,333 | 0          | 0,33       | 2,25                | 1,60                       | 2,22     | -25,0                         | -1,5     |
| 0,333 | 0          | 0,67       | 3,00                | 1,80                       | 2,97     | -66,7                         | -1,1     |
| 0,278 | 0          | 0,67       | 3,12                | 1,80                       | 2,98     | -49,3                         | -4,6     |
| 0,222 | 0          | 0,67       | 3,75                | 2,09                       | 3,46     | -48,1                         | -8,4     |
| 0,194 | 0          | 0,67       | 4,53                | 2,53                       | 3,77     | -59,1                         | -20,3    |
| 0,167 | 0          | 0,83       | 6,00                | 3,27                       | 6,37     | -83,3                         | 5,8      |

Ниже рассматривается определение погрешности в расчете коэффициента формы по (8)–(10) в зависимости от неточности задания  $T_{\min}$ . Для этой цели были смоделированы графики нагрузки при изменении  $T_{\min}$  до 30 % от исходно-заданного и сопоставлены значения  $k_{\phi}^2$ , полученные по (8)–(10), с точными значениями по (1). Результаты сопоставления этих расчетов для графиков мощности 7, 13, 16 и 20 (рис. 1) при задании  $T_{\min}$  на 10...30 % меньше исходного и приведены на рис. 4.

При положительной погрешности в  $T_{\min}$  ошибки в определении  $k_{\phi}^2$  больше, чем при отрицательной. Величина ошибки растет при уменьшении коэффициента заполнения графика нагрузки и может достигать до 60 % для графиков нагрузки с перерывами в электроснабжении 20 часов за сутки (график 20, рис. 1).

Проведенный анализ показывает, что перерывы в электроснабжении приводят к существенному росту  $T_{\min}$ . Для реальных графиков мощности потребителей при бесперерывном питании величина  $k_{\phi}^2$  колеблется в пре-

делах 1,1...1,3 [2], а при ограничениях и перерывах в электроснабжении этот показатель растет до 3...6.

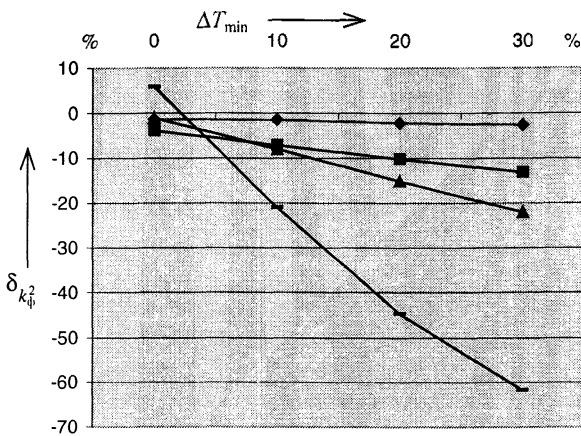


Рис. 4. Зависимости погрешностей определения  $k_{\phi}^2$  по (5) от погрешности в определении  $T_{\min}$ : —◆— для графика № 7 (рис. 1); —■— № 13 (рис. 1); —▲— № 18 (рис. 1); —■— № 20 (рис. 1)

Максимальные погрешности определения  $k_{\phi}^2$  по (8)–(10) даже при значительных неточностях задания  $T_{\min}$  ниже, чем по практически используемым до настоящего времени формулам. Наиболее точной при расчете  $k_{\phi}^2$  с учетом перерыва в электроснабжении является (6). Максимальная погрешность расчета  $k_{\phi}^2$  по (6) достигает 20 %.

## ВЫВОДЫ

1. Для расчета коэффициента формы графика мощности предложено вводить дополнительный параметр – продолжительность режима с минимальной нагрузкой.

2. Получены зависимости для определения  $k_{\phi}^2$ , которые позволяют производить расчеты также для режимов электрической сети с ограничениями и перерывами в электроснабжении. Установлено, что предлагаемые зависимости более точно отражают  $k_{\phi}^2$  как для нормальных графиков нагрузки, так и при ограничениях и перерывах в электроснабжении. Максимальные погрешности предлагаемых зависимостей не превышают 10...20 %.

3. Проанализированы погрешности определения коэффициента формы графиков нагрузки по предлагаемым формулам в зависимости от неточности задания  $T_{\min}$ . Погрешности в задании  $T_{\min}$  на 10...30 % приводят к погрешности в определении  $k_{\phi}^2$ , не превышающей 30 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г. Е., Сыч Н. М. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Под ред. Г. Е. Поспелова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 216 с.
2. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем // В. Э. Воронницкий, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
3. Кезевич В. В. Зависимость числа часов потерь от использования максимума // Электрические станции. – 1948. – № 9.



4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С. С. Ракоцяна и И. М. Шапиро. – М.: Энергия, 1977.

5. Анисимова Л. П., Левин М. С., Пекеллис В. Г. Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях // Электричество. – 1975. – № 4.

6. Зельцбург Л. М., Карпова Э. Л. О методике определения годовых нагрузочных потерь электроэнергии // Электричество. – 1985. – № 1.

7. Железко Ю. С., Васильчиков Е. А. О рациональных способах определения числа часов наибольших потерь и коэффициента формы графика // Электрические станции. – 1988. – № 1.

8. Железко Ю. С. Способы расчета числа часов максимальных потерь электроэнергии // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1990. – № 11. – С. 50–52.

9. Рахимов К. Р. Об определении времени максимальных потерь // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1990. – № 11. – С. 52–55.

Поступила 31.07.2001

УДК 621.316

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ, УЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНОЙ ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

**Доктора техн. наук, профессора ВЕЛИЧКО Л. Н.,  
КАЧУРА Л. П., ЧЕРНЫШЕВ В. О.,  
канд. техн. наук, доц. МЕТЛИЦКИЙ Ю. Н.**

*Закрытое акционерное общество «НПП Белсофт»*

В условиях становления рыночных отношений, спада производства и появления ряда других негативных факторов значительные перемены происходят в энергетике. Расширение сфер применения и возрастающий дефицит энергоресурсов, а также непрерывный рост цен на них предопределяют необходимость освоения современных энергосберегающих технологий, обеспечивающих контроль, учет и управление электроснабжением Республики Беларусь. Одним из прогрессивных направлений повышения эффективности электроснабжения является его информатизация (компьютеризация).

Под комплексной информатизацией энергоснабжения понимается социально-экономический и научно-технический процесс изучения, обеспечения и удовлетворения информационных потребностей и запросов пользователей, способствующий наиболее полному и оперативному получению и использованию достоверной информации, повышающей эффективность организационно-экономических решений по управлению энергоресурсами. Тактической целью информатизации являются интенсификация и улучшение качества процессов, обеспечивающих надежное электроснабжение, рациональное использование электроресурсов, экономию финансов, значительный рост производительности и оперативности управления.