

УДК 338.45:621.31(470.22)

## ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Г. А. Борисов, Т. П. Тихомирова

*Институт прикладных математических исследований  
Карельского научного центра РАН*

В статье обосновывается выделение динамической составляющей нагрузочных потерь энергии в элементах электрических сетей и ее использование для анализа и минимизации потерь методом полной стабилизации мощности.

Ключевые слова: элемент электрической сети, минимум потерь энергии, минимум расчетной мощности, стабилизация мощности (нагрузки).

**G. A. Borisov, T. P. Tikhomirova. ESTIMATION OF THE DYNAMIC COMPONENT OF LOAD LOSSES OF ENERGY FROM ELEMENTS OF POWER GRIDS**

Isolation of the dynamic component of load losses from elements of power grids and its application for the analysis and optimal management by the total power leveling method are substantiated.

Key words: power grid element, minimum power losses, minimum rated capacity, power (load) leveling.

Основной целью «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов, из которых с середины XX столетия в большинстве индустриальных стран и в мире в целом в потери уходит 61–63 % [2, 6]. В их число входят технологические расходы электроэнергии, составляющие в отечественных магистральных сетях 9 %, а в распределительных – 15–20 % [3]. В статье обосновывается выделение в нагрузочных потерях энергии элементов электрических сетей динамической составляющей, ее количественная оценка и метод минимизации путем полной стабилизации нагрузки.

Нагрузочные потери активной энергии в элементах электрических сетей – линиях электропередачи и трансформаторах – при переда-

че активной энергии

$$W = \Delta t \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

с графиком мощности на выходе элемента  $\{P_1, \dots, P_i, \dots, P_n\}$  составляют величину

$$\Delta W_{\Pi} = \frac{R \cdot \Delta t}{U_{\text{cp}}^2} \sum_{i=1}^n P_i^2, \quad (2)$$

где  $R$  – активное сопротивление элемента;  
 $U_{\text{cp}}$  – среднее напряжение на нем;  
 $\Delta t$  – одинаковые интервалы времени, на которых мощность считается равной  $P_i$ .

Сформулируем следующую задачу. При заданных активном сопротивлении  $R$ , среднем напряжении  $U_{\text{cp}}$  и количестве передаваемой энергии  $W$  по элементу электрической сети

определить множество таких нагрузок  $\{P_1, \dots, P_i, \dots, P_n\}$ , при которых нагрузочные потери энергии были бы минимальны, т. е. найти

$$\min \Delta W = \frac{R \cdot \Delta t}{U_{\text{cp}}^2} \sum_{i=1}^n P_i^2. \quad (3)$$

В соответствии с методом неопределенных множителей Лагранжа [5] для достижения условного минимума функции (3) требуется равенство ее производных по аргументам  $P_i$ :

$$\frac{\partial \Delta W}{\partial P_1} = \dots = \frac{\partial \Delta W}{\partial P_i} = \dots = \frac{\partial \Delta W}{\partial P_n} = \lambda. \quad (4)$$

Откуда

$$\frac{2R \cdot \Delta t}{U_{\text{cp}}^2} P_1 = \dots = \frac{2R \cdot \Delta t}{U_{\text{cp}}^2} P_n = \lambda \quad (5)$$

и  $P_1 = \dots = P_i = \dots = P_n$ .

Также, исходя из (1),  $W = \Delta t \cdot n \cdot P_{\text{cp}}$  и

$$P_i = \frac{W}{\Delta t \cdot n} = \frac{W}{T} = P_{\text{cp}}. \quad (6)$$

Таким образом, относительный минимум потерь энергии на элементе при ее заданной величине достигается в том случае, когда при передаче заданного количества энергии  $W$  мощность постоянна.

Если нагрузка элемента отклоняется от среднего значения  $P$ , то это должно привести к появлению дополнительных потерь энергии сверх минимальных. Определим эти дополнительные потери. Для этого последовательно выполним ряд преобразований формулы (6):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}} &= \sum_{i=1}^n P_i; \\ 2 \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}}^2 - 2 \sum_{i=1}^n P_i \cdot P_{\text{cp}} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 &= 2 \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}}^2 - 2 \sum_{i=1}^n P_i \cdot P_{\text{cp}} + \sum_{i=1}^n P_i^2; \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 &= \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}}^2 + \sum_{i=1}^n (P_{\text{cp}} - P_i)^2; \\ \frac{R \cdot \Delta t}{U^2} \sum_{i=1}^n P_i^2 &= \frac{R \cdot \Delta t}{U^2} \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}}^2 + \\ &+ \frac{R \cdot \Delta t}{U^2} \sum_{i=1}^n (P_{\text{cp}} - P_i)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

В результате преобразований получили разделение полных нагрузочных потерь энергии при передаче энергии  $W$  в элементе электрической сети  $\Delta W_{\text{п}}$  (2) на две составляющие — статическую  $\Delta W_{\text{c}}$  и динамическую  $\Delta W_{\text{д}}$ :

$$\Delta W_{\text{п}} = \Delta W_{\text{c}} + \Delta W_{\text{д}}. \quad (8)$$

Первая составляющая  $\Delta W_{\text{c}}$  зависит от суммы квадратов среднего значения нагрузки  $P_{\text{cp}}^2$  или по формуле (6) — от суммы квадратов переданной энергии  $W^2$ , поделенной на  $T^2$ . Она соответствует той части полных потерь энергии в элементе, которая может быть получена при минимизации потерь путем полной стабилизации передаваемой мощности. Вторая составляющая потерь  $\Delta W_{\text{д}}$  зависит от суммы квадратов отклонений текущего значения нагрузки от ее среднего значения, которая в [2] называется неуправляемостью нагрузки ( $\frac{R}{U_{\text{cp}}^2}$ ). Произведение неуправляемости нагрузки на величину  $\frac{R}{U_{\text{cp}}^2}$  следует назвать динамической составляющей потерь энергии элемента.

Нагрузочные потери энергии в электрических сетях определяются по коэффициенту формы графика [1]

$$k_{\Phi}^2 = \frac{\Delta t \sum_{i=1}^n P_i^2}{\Delta t \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}}^2}, \quad (9)$$

поэтому

$$\frac{R \cdot \Delta t}{U_{\text{cp}}^2} \sum_{i=1}^n P_i^2 = \frac{R \cdot \Delta t}{U_{\text{cp}}^2} \cdot k_{\Phi}^2 \sum_{i=1}^n P_{\text{cp}}^2, \quad (10)$$

и

$$\Delta W_{\text{п}} = k_{\Phi}^2 \cdot \Delta W_{\text{c}}, \quad (11)$$

т. е. полные нагрузочные потери пропорциональны статическим потерям. Тогда после подстановки (11) в (8) получим

$$\Delta W_{\text{д}} = \Delta W_{\text{c}} (k_{\Phi}^2 - 1). \quad (12)$$

Эта формула дает возможность воспользоваться для приближенного определения динамической составляющей нагрузочных потерь действующей нормативной базой с применением значений коэффициентов заполнения точных графиков  $k_3$  [1]:

$$k_{\Phi}^2 = \frac{1 + 2k_3}{3k_3}. \quad (13)$$

При стабилизации нагрузки элемента сети ( $P_i = P_{\text{cp}}$ ) динамическая составляющая потерь энергии снижается до нуля и полные потери энергии становятся равными статической составляющей. Ввиду этого статическую составляющую потерь энергии можно считать пределом снижения полных потерь, а динамическую — теоретическим (валовым) потенциалом снижения потерь энергии. Минимум достигается при полной стабилизации передаваемой по элементу нагрузки.

При минимизации потерь энергии методом стабилизации нагрузки, когда  $P_i = P_{cp}$ , достигается еще один минимум – минимальная расчетная нагрузка элемента, величина которой влияет на выбор основных параметров элементов сети – номинального напряжения, сечений проводов линий электропередачи и номинальных мощностей у трансформаторов – и определяет суммарные приведенные затраты на элементе сети. Это происходит потому, что из множества нагрузок графика  $\{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\}$ , необходимых для передачи заданного количества энергии  $W$ , одна является наибольшей и равной  $P_{imax}$ . Замена неравномерного графика на стабильный с постоянной нагрузкой  $P$  снижает расчетную нагрузку с  $P_{imax}$  до  $P_{cp}$ . Последняя ( $P_{cp}$ ) является минимальной из всех возможных для передачи заданного количества  $W$ .

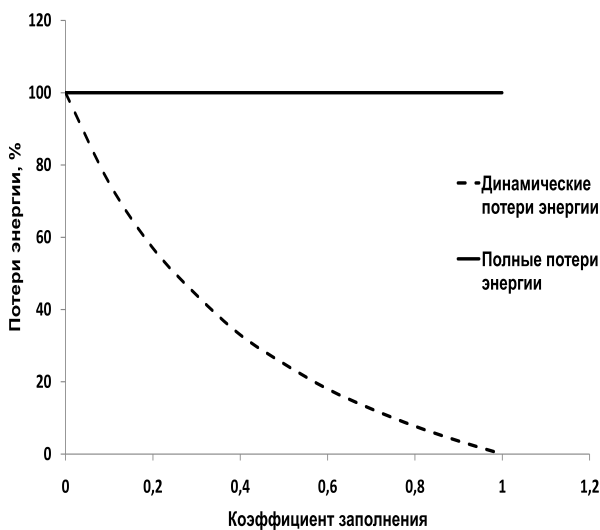
Потенциал снижения расчетной нагрузки при ее полной стабилизации может быть оценен с использованием коэффициента заполнения  $k_3$  суточного графика:

$$\frac{P_{max}}{P_{cp}} = \frac{1}{k_3}. \quad (14)$$

или

$$\Delta P = P_{max} - P_{cp} = \frac{P_{cp}}{k_3}(1 - k_3). \quad (15)$$

В зависимости от коэффициента заполнения  $k_3$  суточного графика соотношения динамических, статических и полных потерь энергии в элементе представлены на рис.



Зависимость потерь энергии от коэффициента заполнения графика

График дает представление о потенциале и практической возможности снижения динамической составляющей нагрузочных потерь при полной стабилизации нагрузки элемента сети и может использоваться в случае частичной стабилизации нагрузки с увеличением коэффициента заполнения графика нагрузки.

При передаче по элементу сети в  $i$ -й промежуток времени реактивной мощности  $Q_i$  нагрузочные потери энергии в нем составляют величину, определяемую по формуле

$$\Delta W = \frac{R \cdot \Delta t}{U_{cp}^2} \sum_{i=1}^n Q_i^2, \quad (16)$$

которая идентична формуле (2) для потерь при передаче активной энергии. Поэтому минимум потерь активной энергии методом стабилизации также достигается при передаче реактивной или полной мощности.

Количественная оценка потенциала снижения потерь активной энергии и потерь активной мощности в элементах и частях электрической сети за счет исключения динамической составляющей потерь энергии методом стабилизации нагрузки легко получается по формулам (12), (13) с использованием коэффициентов заполнения суточных графиков нагрузки  $k_3$ , имеющихся в литературе [1, 4]. Такие оценки приведены в табл.

## Выводы

1. Нагрузочные потери энергии на элементе сети с активным сопротивлением разделяются на две составляющие – статическую и динамическую, зависящие от различных влияющих на них параметров. Динамическая составляющая потеря энергии зависит от суммы квадратов отклонения текущих значений нагрузки от ее среднего значения.
2. Нагрузочные потери электрической энергии в элементе электрической сети достигают условного минимума при полной стабилизации графика нагрузки на уровне среднего значения нагрузки за рассматриваемый период за счет снижения до нуля их динамической составляющей.
3. Стабилизация нагрузки одновременно приводит к максимальному снижению требующейся расчетной нагрузки и минимуму потерь активной энергии при передаче реактивной и полной.

## Количественные оценки динамической составляющей потерь активной энергии

Графики нагрузки потребителей	Литературный источник	Коэф. заполнения $k_z$	Коэф. формы $k_\Phi^2$	Статические потери $\Delta, \%$	Динамические потери, $\%$	Снижение полных потерь, разы	Снижение расчетной мощности, разы
Энергосистема региона	[3]	0,7–0,77	1,14–1,16	86–88	12–14	1,13–1,16	1,33–1,43
Жилые дома с газовыми и дровяными плитами летом	[6]	0,4	1,5	67	33	1,5	2,5
ЛЭП 0,4 кВ	[5]	0,3	1,78	56	44	1,8	3,33
Отдельные городские квартиры	*)	0,07–0,2	2,33–5,4	18,5–43	57–81,5	2,3–5,4	5–14,3

\*) – данные получены по результатам натуральных наблюдений студентов в г. Петрозаводске.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь энергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2006. 280 с.
2. Макаров А. А. Научно-технологические прогнозы и проблемы развития энергетики России до 2030 г. Вестник РАН, 2009. Т. 79, № 3, С. 206–215.

3. Родионов В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. М.: ЭНАС, 2010. 352 с.

4. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / Под общ. ред. А. А. Федорова. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1987. 592 с.

5. Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. Т. 2. М.: Наука, 1968. 463 с.

6. Энергетика и геополитика / Под. ред В. В. Костюка, А. А. Макарова. Российская академия наук. М.: Наука, 2011. 397 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Борисов Георгий Александрович**  
старший научный сотрудник, к. т. н.  
Институт прикладных математических исследований  
Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: borisov@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 766312

**Borisov, Georgy**  
Institute of Applied Mathematical Research,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: borisov@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 766312

**Тихомирова Тамара Петровна**  
ученый секретарь, к. т. н.  
Институт прикладных математических исследований  
Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: tihomiro@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 785520

**Tikhomirova, Tamara**  
Institute of Applied Mathematical Research,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: tihomiro@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 785520