

УДК 621.316.11

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ***Воронина Е. В., Хлебникова М. В.,  
Хлебникова Н. В.*

Донской государственной технической универси-  
тет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
[vev\\_94katerina@mail.ru](mailto:vev_94katerina@mail.ru)  
[hlvk@rambler.ru](mailto:hlvk@rambler.ru)

Рассматривается влияние емкостных токов ка-  
бельных линий на установившийся режим го-  
родской сети и потери электроэнергии. Пред-  
ложена упрощенная схема замещения для рас-  
чета потерь электроэнергии в кабельных лини-  
ях. Выполнена оценка погрешностей, возни-  
кающих при переходе к упрощенной схеме  
замещения.

**Ключевые слова:** распределительные элек-  
трические сети, потери электроэнергии, схемы  
замещения кабельных линий.

**Введение.** Объектом данного исследования является городская электрическая сеть. Суще-  
ственная ее часть состоит из кабелей 10(6)°кВ. Особенность эксплуатации кабельных линий (КЛ)  
— значительные емкостные токи. Например, в кабельной сети, питающейся от центральной под-  
станции 110/10°кВ, суммарная протяженность КЛ составляет 141,507°км, а емкостные токи замы-  
кания достигают 50А на секцию центральной подстанции.

В схемах замещения линий при расчетах установившихся режимов сетей 10°кВ, как прави-  
ло, пренебрегают активными и емкостными проводимостями на землю.

Целью работы является исследование влияния емкостной проводимости КЛ на величину  
нагрузочных потерь электроэнергии при различных нагрузках трансформаторов трансформатор-  
ных подстанций (ТП).

Для оценки влияния сформированы модели сети с учетом и без учета емкостных проводи-  
мостей КЛ. В расчетную схему вошли КЛ суммарной протяженностью 20,717°км.

**Методика расчета потерь электроэнергии.** Режимы работы распределительных сетей  
10°кВ определяются нагрузками потребителей. Схема сети — разомкнутая, что позволяет выпол-  
нять расчеты для каждой распределительной линии 10°кВ.

Ежемесячно измеряется отпуск энергии на «голове» распределительной линии (фидера) и  
по некоторым ТП. Это позволяет рассчитывать потери электроэнергии методом средних нагруз-  
зок [1, 2], которые можно определить одним из способов:

- по данным ежемесячных замеров отпуска электроэнергии по ТП;
- разделив замер энергии на голове фидера пропорционально мощности трансформаторов ТП.

В основу метода средних нагрузок положены следующие соотношения, позволяющие  
определить потери электроэнергии при сопротивлении  $R$  за период  $T$  [3].

При известном графике тока, протекающего по сопротивлению:

UDC 621.316.11

**ELECTRIC LOSS CALCULATION  
FEATURES IN ELECTRIC POWER  
CABLE SYSTEMS***Voronina E. V., Khlebnikova M. V.,  
Khlebnikova N. V.*

Don State Technical University  
Rostov-on-Don, Russian Federation  
[vev\\_94katerina@mail.ru](mailto:vev_94katerina@mail.ru)  
[hlvk@rambler.ru](mailto:hlvk@rambler.ru)

The article considers the influence of capacitive  
currents of cable lines on the urban network  
mode and power loss. A simplified replacement  
scheme is proposed for calculating electric pow-  
er losses in cable lines. The estimation of the er-  
rors arising in transition to a simplified scheme  
of substitution is made.

**Keywords:** electrical distribution system, power  
losses, cable lines replacement schemes.

$$\Delta W_H = 3R \int_0^T I^2(t) dt = 3RM[I^2]T = 3R(M[I])^2 K_{\text{тм}}^2 T;$$

при известном графике напряжения на сопротивлении:

$$\Delta W_H = 3R \int_0^T I^2(t) dt = 3R M[I^2]T = 3R(M[I])^2 K_{\text{фл}}^2 T,$$

где  $M$  — символ математического ожидания, среднего значения соответствующей величины за период  $T$ ;  $K_{\text{фл}}^2$  — коэффициент формы графиков тока и напряжения.

Интегральные характеристики параметров режима головной ветви каждого фидера для месяца  $m$  определяются следующим образом<sup>о</sup>[4].

Среднее значение тока головной ветви фидера:

$$I_{\text{ср}m} = \frac{|W_m|}{24\sqrt{3} D_m U_{\text{ср}m} K_{wm}},$$

где  $W_m$  — пропуск энергии по головной ветви фидера за месяц  $m$ ;  $D_m$  — количество дней месяца  $m$ ;  $U_{\text{ср}m}$  — математическое ожидание напряжения на шинах питающей подстанции месяца  $m$ ;  $K_{wm}$  — коэффициент, учитывающий корреляционную зависимость между модулем полной мощности и фазовым углом головной ветви (обычно принимается равным 0,97).

Составляется схема замещения рассматриваемого участка сети и рассчитываются активные и индуктивные сопротивления, поперечные проводимости, параметры элементов схемы замещения. Нагрузки в узлах схемы замещения сети, соответствующих шинам низкого напряжения трансформаторов ТП, определяются по формуле:

$$S_i = S_r \frac{S_{Hi}}{S_{H\Sigma}},$$

где  $S_{Hi}$  — номинальная мощность  $i$ -го трансформатора фидера;  $S_{H\Sigma}$  — сумма номинальных мощностей всех трансформаторов фидера;  $S_r = W_r/T$  — средняя за период  $T$  мощность головной ветви фидера, МВ·А;  $W_r$  — энергия, пропущенная по головной ветви фидера за период  $T$ , МВт·ч;  $T$  — период работы, час.

Выполняется расчет токораспределения по ветвям схемы замещения и напряжений в узлах схемы.

Затем определяются потери:

— активной и реактивной мощности во всех ветвях, соответствующих участкам линий  $\Delta \dot{S}_{л\Sigma}$ ;

— нагрузочные в соответствующих трансформаторах ТП  $\Delta \dot{S}_{\text{тп}\Sigma}$ .

Далее вычисляются потери  $\Delta \dot{S}_{\text{тп}\Sigma}$  :

— холостого хода трансформаторов ТП;

— в изоляции кабелей.

После расчета установившегося режима при заданных  $S_i$  проверяется небаланс мощности в фидере

$$\delta \dot{S} = \dot{S}_i - \sum \dot{S}_i - \Delta \dot{S},$$

где  $\Delta \dot{S}$  — суммарные потери мощности в фидере.

Если величина небаланса мощности в фидере недопустима,  $|\delta S| > \varepsilon_s$  (например,  $\varepsilon_s = 0,0001$ ), то нагрузки трансформаторов ТП корректируются:

$$S_i = S_i + \alpha \cdot \delta S,$$

где коэффициент релаксации  $\alpha$  принят равным 0,5.

Исходя из расчета установившегося режима работы фидера определяются параметры схемы его замещения —  $Z_{лэ}, Z_{тэ}, Y_{тэ}, \xi = I_B/I_T$  (рис. 1) [5]:

$$\begin{aligned} Z_{лэ} &= \Delta S_{лэ} / I_r^2; \quad U_T = U_r - Z_{лэ} \cdot I_r; \\ Y_{тэ} &= \Delta \hat{S}_{тэ} / U_T^2; \quad I_T = I_r(1 - \xi) - Y_{тэ} U_T; \\ Z_{тэ} &= \Delta S_{тэ} / I_T^2; \quad \xi = I_B / I_T. \end{aligned}$$

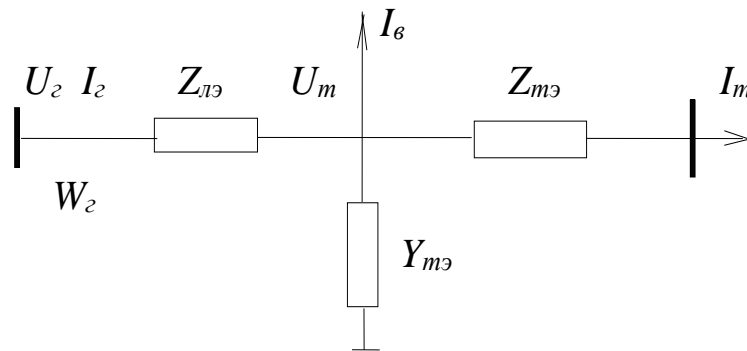


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения фидера

Потери энергии в схеме фидера — в линиях  $\Delta W_{лэ}$ , нагрузочные  $\Delta W_{тэ}$  и постоянные  $\Delta W_{тп}$  в трансформаторах определяются по эквивалентной схеме фидера:

$$\Delta W_{лэ} = Z_{лэ} \cdot M[I_r^2] \cdot T; \quad \Delta W_{тэ} = Z_{тэ} \cdot M[I_T^2] \cdot T; \quad \Delta W_{тп} = Y_{тэ} \cdot M[U_T^2] \cdot T.$$

Величины  $I_{лэ}, I_T, U_T$  согласно схеме замещения будут равны:

$$\begin{aligned} I_{лэ} &= A_{лэ} U_r + C_{лэ} I_r, \quad \text{где } A_{лэ} = 0, \quad C_{лэ} = 1; \\ I_T &= A_{тэ} U_r + C_{тэ} I_r, \quad \text{где } A_{тэ} = -Y_{тэ}, \quad C_{тэ} = 1 - \xi + Z_{лэ} Y_{тэ}; \\ U_T &= A_{тп} U_r + C_{тп} I_r, \quad \text{где } A_{тп} = 1, \quad C_{тп} = -Z_{лэ}. \end{aligned}$$

Математические ожидания квадратов модулей величин  $I_{лэ}, I_T, U_T$  определяются по выражению

$$M[V^2] = A_v^2 M[U_r^2] + C_v^2 M[I_r^2] + \frac{2}{T} \text{Re}[A_v C_v W_r],$$

где  $V$  — одна из указанных величин;  $A_v, C_v$  — коэффициенты приведенных выше выражений;  $M[I_r^2]$  определяется по среднему току  $I_{cpm}$  и коэффициенту формы  $K_{фIm}$ ;  $M[U_r^2]$  рассчитывают по  $U_{cpm}$  и коэффициенту формы  $K_{фU}$ .

Параметры элементов схемы замещения фидера вычисляются по следующим формулам [6]:

$$r_{лэ} = r_0 \cdot l / n, \quad x_{лэ} = x_0 \cdot l / n, \quad Z_{лэ} = r_{лэ} + jx_{лэ}, \quad B_{лэ} = b_0 l n,$$

где  $r_0, x_0$  — погонные сопротивления;  $n$  — число параллельных цепей;  $l$  — длина линии;  $b_0$  — погонная проводимость.

**Алгоритм расчета.** Расчет токораспределения в ветвях схемы замещения выполняется в описанной ниже последовательности<sup>о</sup>[7].

1. По замерам отпущенной за расчетный интервал  $T$  час активной и реактивной энергии  $W_a$ ,  $W_p$  и среднему значению напряжения  $U_{цп}$  вычисляются активная и реактивная составляющие тока головного участка

$$\dot{I}_{г\text{ ср}} = I_{г\text{ ср акт}} + jI_{г\text{ ср реакт}}.$$

Здесь

$$I_{г\text{ ср акт}} = \frac{W_a}{\sqrt{3} \cdot U_{цп} \cdot T}, \quad I_{г\text{ ср реакт}} = \frac{-W_p}{\sqrt{3} \cdot U_{цп} \cdot T}.$$

2. Составляющие тока головного участка распределяются пропорционально номинальным мощностям трансформаторов, подключенным к фидеру. Узловые токи будут равны:

$$J = I_{г\text{ ср}} \frac{S_{ном\ k}}{\sum_{i=1}^m S_{ном\ i}}.$$

Здесь  $S_{ном\ k}$  — номинальная мощность трансформатора в  $k$ -м узле. Величина тока  $J_k$  корректируется на величину емкостного тока на землю в узле  $K$ .

3. По уравнению первого закона Кирхгофа вычисляются токи в ветвях схемы замещения  $I_c$ , начиная с наиболее удаленных от центра питания ветвей.

4. По найденным в п. 3 токам ветвей определяются нагрузочные потери активной мощности в линиях  $\Delta P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ );  $\Delta P_l = 3I_l^2 \cdot r_{лl}$ .

5. Суммарные потери во фидере равны:

$$\Delta P_{фл} = \sum_i \Delta P_i.$$

6. Определяются напряжения в узлах схемы сети:

$$\dot{U}_2 = U_{цп} - \sqrt{3} \dot{I}_{12} Z_{л1}, \quad \dot{U}_3 = \dot{U}_2 - \sqrt{3} \dot{I}_{23} Z_{л2} \text{ и т. д.}$$

7. Токи нагрузки трансформаторов определяются по величине узлового тока  $J_k$  и параметрам холостого хода трансформаторов:

$$I_k = J_k - \left( \frac{\Delta P_{xx\ k}}{\sqrt{3} U_k} - J \frac{I_{xx\ k}}{100} \frac{S_{ном\ k}}{\sqrt{3} U_k} \right).$$

8. Нагрузочные потери активной мощности в трансформаторе равны:

$$\Delta P_{н\ k} = 3 \Delta P_{кз\ k} \left( \frac{U_k^2 I_k^2}{n_{т\ k} S_{ном\ k}^2} \right),$$

где  $n_{т\ k}$  — число параллельно работающих трансформаторов в узле  $k$ .

9. Условно постоянные потери активной мощности в трансформаторах сети вычисляются по формуле:

$$\Delta P_{x\ k} = \Delta P_{кз\ k} \left( \frac{U_k}{U_{ном}} \right)^2.$$

Здесь  $P_{xx\ k}$   $P_{кз\ k}$  — потери холостого хода и короткого замыкания в трансформаторе  $k$ -го ТП.

**Результаты экспериментов.** Изложенная методика использована для расчета нагрузочных и условно постоянных потерь электроэнергии в 10 фидерах 10°кВ. Расчеты выполнены при равномерном распределении нагрузок между трансформаторами 10/0,4°кВ. Рассмотрены два уровня нагрузки каждого трансформатора: 100 % номинальной мощности (вариант А) и 60 % номинальной мощности (вариант Б). В варианте А параметры схем замещения отдельных линейных участков фидера определялись по (1). В варианте Б емкостная проводимость линейных участков приравнена к нулю ( $B = 0$ ).

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Потери электроэнергии в кабельных линиях

Фидер №	Потери энергии в ЛЭП; $\Delta W_{\text{лэп}} \text{ нагр.}$ , МВт·ч при нагрузке в 100 %			Потери энергии в ЛЭП; $\Delta W_{\text{лэп}} \text{ нагр.}$ , МВт·ч при нагрузке в 60 %		
	$B = b0l \cdot n$	$B = 0$	Изм., %	$B = b0l \cdot n$	$B = 0$	Изм., %
5	60,157	60,873	1,176	21,491	21,914	1,93
6	60,157	60,873	1,176	21,491	21,914	1,93
12	711,63	713,474	0,258	255,748	256,851	0,43
20	1971,506	1983,414	0,6	706,944	714,029	0,99
21	1514,505	1517,397	0,19	544,536	546,256	0,315
22	222,483	222,940	0,205	79,162	80,258	1,366
24	152,616	152,784	0,12	54,901	55,002	0,184
25	249,807	250,776	0,386	89,701	90,279	0,64
27	475,827	477,386	0,327	170,928	171,859	0,542
32	436,597	437,266	0,153	157,015	157,416	0,255
Всего	5855,285	5877,183	0,373	2101,917	2115,778	0,655

В табл. 1 процент изменения потерь электроэнергии по строке «Всего» при уровнях нагрузки каждого трансформатора: 100 % номинальной мощности и 60 % номинальной мощности (0,373 % и 0,655 %) определен с помощью изучения динамики и тренда итоговых показателей потерь в сети в именованных единицах измерения, например

$$\frac{5877,183 - 5855,285}{5855,285} 100\% = 0,373\% ;$$

$$\frac{2115,778 - 2101,917}{2101,917} 100\% = 0,655\% .$$

При емкостной проводимости  $B \neq 0$  напряжения в узлах схемы замещения фидеров повышаются, что приводит к некоторому росту потерь электроэнергии в трансформаторах (холостого хода и нагрузочных). Потери нагрузочные  $\Delta W_{\text{тр нагр}}$  и холостого хода  $\Delta W_{\text{тр хх}}$  увеличиваются на доли процента (от 0,002 % до 0,009 %).

В основном, изменяются нагрузочные потери электроэнергии в КЛ ( $\Delta W_{\text{лэп нагр}}$ ). При использовании упрощенных схем замещения ( $B = 0$ ) нагрузочные потери возрастают на 0,11 %–2,4 % в зависимости от уровня нагрузки сети.

**Выводы**

1. В результате проведенного авторами эксперимента установлено, что применение упрощенных схем замещения кабельных линий приводит к завышению нагрузочных потерь электроэнергии. При росте нагрузки сети снижается динамика роста потерь электроэнергии (в сравнении с эталонным уровнем).

2. Потери электроэнергии в трансформаторах ТП фидеров практически не изменяются при переходе к упрощенным схемам замещения КЛ.

3. Показана возможность применения предложенной авторами упрощенной схемы замещения при прогнозировании потерь электроэнергии.

#### **Библиографический список**

1. Кушнарв, Ф. А. Методика расчета технологического расхода электроэнергии в распределительных электроэнергетических сетях / Ф. А. Кушнарв, В. К. Хлебников // Изв. выс. учеб. заведений. Электромеханика. — 2000. — № 3. — С. 82.

2. Хлебников, В. К. Обновленная методика расчета норматива потерь электроэнергии при ее передаче субабонентам / В. К. Хлебников, Б. П. Золоев, И. Ф. Бураков // Изв. выс. учеб. заведений. Электромеханика. — 2009. — Спецвыпуск «Электроснабжение». — С. 92–93.

3. Воронина, Е. В. Economics and management in power engineering / Е. В. Воронина // Экономика и парадигма нового времени. — 2017. — № 2. — С. 5–7.

4. Хлебников, В. К. Снижение потерь электроэнергии при регулировании напряжения трансформатором / В. К. Хлебников, В. Ф. Кравченко, Б. П. Золоев // Изв. выс. учеб. заведений. Электромеханика. — 2012. — № 2. — С. 56–59.

5. Хлебников, В. К. Прогнозирование балансов электроэнергии при нормировании потерь в электрических сетях / В. К. Хлебников, Б. П. Золоев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2013. — № 1. — С. 16–18.

6. Хлебников, В. К. Некоторые вопросы совершенствования методической базы разработки нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям регулируемых организаций / В. К. Хлебников, Б. П. Золоев // Изв. выс. учеб. заведений. Электромеханика. — 2012. — № 2. — С. 59–61.

7. Семенов, А. А. Характеристики потерь электроэнергии в электрических сетях электроэнергетических систем / А. А. Семенов, В. К. Хлебников // Изв. выс. учеб. заведений. Электромеханика. — 2006. — № 6. — С. 14–17.