

# О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях

АРУТЮНЯН А.Г.

*Рассматривается вопрос потерь активной мощности в сетях 0,23–0,24 кВ при несимметричной нагрузке. Проблема является актуальной, так как даже в быту все большее число потребителей имеют нелинейную вольт-амперную характеристику. Потери электроэнергии являются составляющей частью тарифа на передачу электроэнергии, и более точное их определение также является актуальным для распределительной сетевой компании. Предлагается методика определения дополнительных потерь активной мощности трехфазных четырехпроводных электрических сетей 0,4/0,23 кВ при искажении и несимметрии фазных токов и напряжений. В существующей методике определения потерь электрических сетей указанные потери определяются с помощью формулы, которая при искажении кривых фазных напряжений и токов не учитывает потери в фазных и нулевом проводах. Предлагаемый метод позволяет определить потери с достоверной точностью в любом режиме трехфазных электрических сетей 0,4/0,23 кВ. Это позволит повысить достоверность оценки дополнительных потерь активной мощности в городских электрических сетях.*

*Ключевые слова: низковольтные сети, несимметричная нагрузка, потери активной мощности*

В настоящее время примерно 40% вырабатываемой электроэнергии в мире реализуется через электрические сети (ЭС) 0,4/0,23 кВ [1, 2]. Например, в Москве около 40 % вырабатываемой электроэнергии потребляется бытовым сектором и общественными зданиями [2].

Широкое применение устройств с нелинейными вольт-амперными характеристиками в быту и в промышленности приводит к неравномерному и неодновременному изменению графиков нагрузок по фазам [3]. Такое положение приводит к увеличению потерь активной мощности ЭС 0,4/0,23 кВ и в питающих трансформаторах, что приводит к уменьшению срока службы трансформаторов, кабелей, линий электропередачи и коммутационных аппаратов [4], т.е. ухудшается технико-экономическое положение предприятий и электрических сетей.

Указанная проблема особенно актуальной стала в последние годы, после широкого внедрения компактных люминесцентных ламп (КЛЛ). Возникла инженерная проблема выбора сечения рабочего нулевого провода для осветительных электрических сетей 0,4/0,23 кВ. Эту проблему в [5] предлагают решать в зависимости от типа балласта газоразрядных ламп и сечения фазных проводов.

Однако практика показывает, что такой подход не решает технико-экономические проблемы предприятий потребителей и электрических сетей. Для частичного решения экономических проблем пред-

приятий и электрических сетей необходимо достоверно оценить дополнительные потери в действующих ЭС 0,4/0,23 кВ.

В [6] для учета дополнительных потерь электроэнергии при несимметричных режимах ЭС 0,4/0,23 кВ применяется коэффициент неравномерности  $K_{\text{нер}}$ , который определяется формулой (52) из [6].

Как известно, при симметричных режимах ЭС 0,4/0,23 кВ в рабочем нулевом и фазных проводах соответственно может протекать ток  $I_{00\bar{y}}$  и  $I_{00\bar{y}}/3$  из-за искажения кривых фазных напряжений [7]. Очевидно, что при симметричных режимах ЭС 0,4/0,23 кВ  $K_{\text{нер}} = 1$ , если определять по формуле (52) из [6]. Следовательно, эта формула не может учитывать дополнительные потери в нулевом и фазных проводах во всех режимах ЭС 0,4/0,23.

Согласно [7] такой режим возможен при наличии в фазных нагрузках потребителей с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Для подтверждения этого вывода проведем эксперимент по схеме на рис. 1, где потребителями на каждой фазе являются две КЛЛ с номинальной мощностью  $P_{\text{н}} = 8$  Вт.

Действующие значения измеренных величин во время эксперимента:

Мощность (фазы):

полная

активная

реактивная

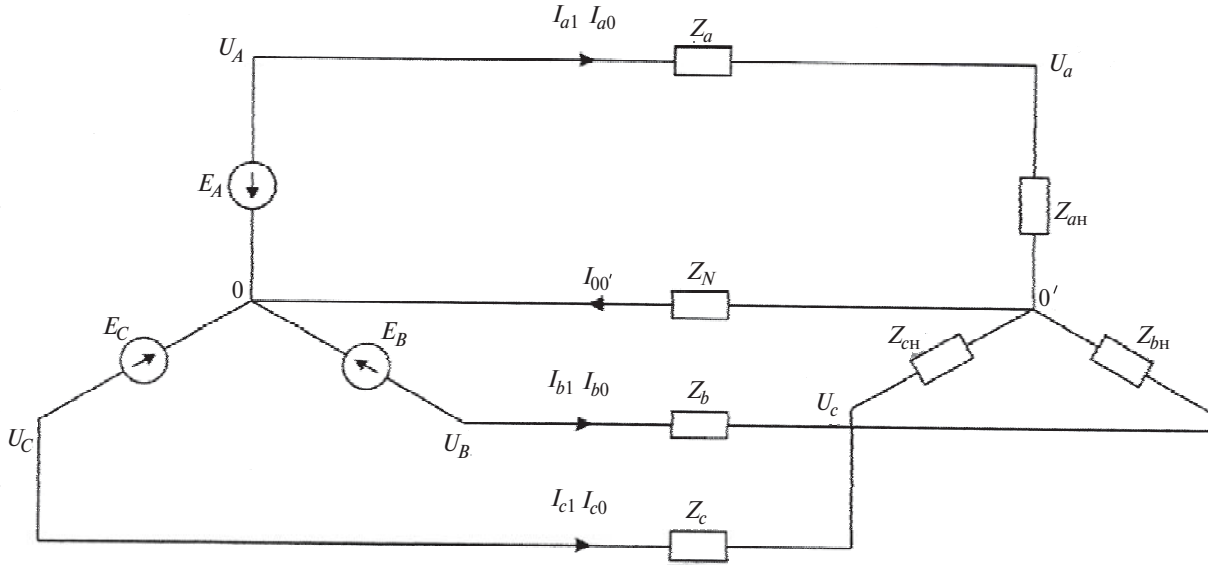
Напряжение (фазы):

$$S_A = S_B = S_C = 33 \text{ ВА}$$

$$P_A = P_B = P_C = 17 \text{ Вт}$$

$$B_A = B_B = B_C = 28 \text{ вар}$$

$$U_A = 232 \text{ В}$$



**Рис. 1.** Трехфазная четырехпроводная сеть:  $E_A, E_B, E_C$  и  $U_A, U_B, U_C$  – фазные ЭДС и напряжения источника питания;  $U_a, U_b, U_c$  – фазные напряжения потребителей;  $I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}, I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}$  – прямая и нулевая составляющие фазных токов;  $U_{00'}$ ,  $I_{00'}$  – напряжение и токи между точками 0, 0'соответственно;  $Z_{ан} = Z_{бн} = Z_{сн}$  – полное сопротивление фазных нагрузок

$U_B = 230$  В  
 $U_C = 231$  В

Ток (фазы):  $I_A = I_B = I_C = 0,14$  А

Комплексные значения фазных напряжений:

$U_A = 232$  В  
 $U_B = -117,1 - j198$  В  
 $U_C = -114,1 - j201$  В

Измеренный и расчетный ток в нулевом проводе

$I_{00'из} = 0,24$  А  
 $I_{00'рас} = 0,28$  А

Расчетное значение линейного и фазного напряжения нулевой последовательности

$U_{л} = 390$  В;  
 $U_{ф} = 230,6; 228$  В

Напряжение нулевой последовательности в фазном напряжении

$U_{ф0} = 1,36$  В

Измеренное и расчетное значение падения напряжения в нулевом проводе

$U_{00'из} = 3,8$  В;  
 $U_{00'рас} = 4,0$  В

Потери полной мощности в нулевом проводе

$S_{0из} = 0,912$  ВА;  
 $S_{0рас} = 0,992$  ВА

Суммарные потери полной мощности в фазах и нулевом проводе

$2S_{0из} = 1,824$  ВА;  
 $2S_{0рас} = 1,984$  ВА

Коэффициент искажения синусоидальности фазного напряжения

$K_{ис} = 1,65\%$

Для определения значения коэффициента искажения  $K_{ис}$  были разложены в ряд Фурье кривые фазных напряжений, приведенные на рис. 2,а. Полученные при эксперименте результаты позволили определить напряжения прямой (линейное и фазное) и нулевой последовательности в фазных напряжениях. Эти значения были определены также по методу [8]: результаты расчета практически совпадают. По полученным результатам было определено  $K_{ис}$  согласно ГОСТ 12109–97; напряжение обратной последовательности  $U_2 = 0$ , т.е. в фазных напряжениях отсутствует напряжение обратной последовательности.

Из результатов эксперимента видно, что кривые фазных токов (рис. 2,б) имеют импульсный характер и по значению они меньше тока  $I_{00'}$  (рис. 2,в).

Важно отметить, что результаты эксперимента в основном совпадают с результатами [9].

В статье приводится разработка метода определения дополнительных потерь активной мощности нулевой последовательности в нулевом и фазных проводах ЭС 0,4/0,23 кВ при несимметричных и несинусоидальных фазных напряжениях.

Согласно [9] полную мощность ЭС 0,4/0,23 кВ (рис. 1) можно определить по формуле

$$S = S_1 + 2S_0 \text{ ВА,} \tag{1}$$

где  $S_1$  – полная мощность предполагаемого симметричного режима ЭС 0,4/0,23 кВ;  $2S_0$  – полная мощность дополнительных потерь в нулевом и в фазных проводах.

Мощность  $2S_0$  можно определить согласно [9]:

Результаты эксперимента показывают, что при одинаковой потребляемой активной, реактивной и полной мощности по фазам, т.е.  $Z_{ан} = Z_{бн} = Z_{сн}$ , в нулевом проводе протекает ток  $I_{00'}$  (рис. 2,в).

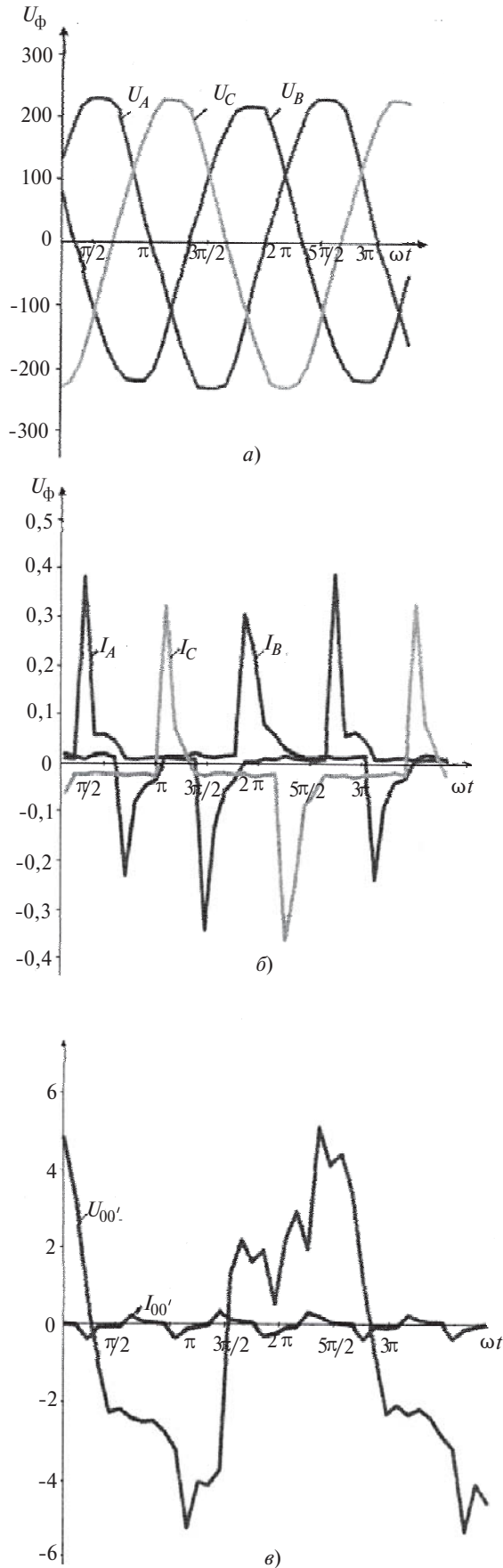


Рис. 2. Результаты эксперимента: а – \$U\_a, U\_b, U\_c\$ – кривые фазных напряжений на зажимах потребителей; б – \$I\_a, I\_b, I\_c\$ – кривые фазных токов; в – \$U\_{00'}, I\_{00}'\$ – кривые напряжения и тока между точками 00' (см. рис. 1)

$$2S_0 = 2U_{00\check{y}} I_{00\check{y}}^*, \text{ В\cdot А}, \quad (2)$$

где \$I\_{00\check{y}}^\*\$ – сопряженное значение комплексного тока \$I\_{00\check{y}}\$; \$U\_{00\check{y}}\$ – значение напряжения между точками 0 и 0' (рис. 1).

Для определения комплексных значений \$U\_{00\check{y}}\$ и \$I\_{00\check{y}}\$ необходимо найти комплексные значения фазных напряжений \$U\_A, U\_B, U\_C\$, что можно сделать, используя результаты эксперимента с измерением разницы углов (а) кривых мгновенных значений фазных напряжений \$U\_{BМ}, U\_{СМ}\$, за основу взяв кривую \$U\_{АМ}\$.

После чего комплексные значения фазных напряжений согласно [7] можно определить по формуле

$$\check{U}_\phi = U_M e^{ia} = U_M (\cos a + j \sin a), \text{ В},$$

откуда можно определить действующие значения комплексных фазных напряжений (ранее приведенные данные). Определить сопряженное значение комплексных фазных токов можно по формуле

$$I_\phi^* = \frac{S_\phi}{U_\phi}, \text{ А}. \quad (3)$$

После этого можно определить комплексные значения проводимости фаз (\$Y\_{Ан}, Y\_{Вн}, Y\_{Сн}\$).

При известных комплексных значениях фазных напряжений, токов и проводимостей можем определить согласно [10]

$$U_{00\check{y}} = \frac{U_A Y_{Ан} + U_B Y_{Вн} + U_C Y_{Сн}}{2/3(Y_{Ан} + Y_{Вн} + Y_{Сн}) + Y_{00\check{y}}}, \text{ В},$$

где \$Y\_{00\check{y}}\$ – проводимость нулевого провода.

Ток в нулевом проводе

$$I_{00\check{y}} = I_A + I_B + I_C, \text{ А}.$$

Дополнительные потери в фазных и нулевом проводах можем определить по (2). Результаты расчета по предложенному методу в нулевом проводе и суммарные потери \$2S\_0\$ приведены ранее. Погрешность определения \$U\_{00\check{y}}\$ составляет всего 5,2%, а погрешность расчета дополнительных потерь \$2S\_0\$ в ЭС 0,4/0,23 кВ для данного примера составляет 8,8%.

Анализ результатов эксперимента и расчета показывает, что при искажении и несимметрии фазных напряжений в ЭС 0,4/0,23 кВ дополнительные потери мощности в фазных и нулевых проводах с достаточной точностью для инженерных рас-

четов целесообразно определять по изложенному методу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Палмер Д.** Потребление электроэнергии на освещение в жилом секторе Великобритании. — Светотехника, 1996, № 8, с. 21–27.
2. **Айзенберг Ю.Б.** О предложениях энергосбережения в осветительных установках г. Москвы. — Светотехника, 1996, № 5/6, с. 20–23.
3. **Арутюнян А.Г.** Учет активной электроэнергии в трехфазной четырехпроводной системе при несимметричном режиме. — Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика, 2006, № 4, с. 40–44.
4. **Райцельский Л.А.** Нелинейные электрические нагрузки. — Светотехника, 1993, № 8, с. 20–22.
5. **Клюев С.А.** Выбор сечения нулевых рабочих проводников для осветительных сетей с заземленной нейтралью. — Светотехника, 1994, № 9, с. 24–25.

6. **Инструкция** по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Приказ Минэнерго России от 30 декабря 2008 г. № 326, с изменениями и дополнениями от 1 февраля 2010 г.

7. **Теоретические** основы электротехники. Ч. 1. Атабеков Г.И. Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1978, 592 с.

8. **Железко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. — М.: ЭНАС, 2009, 456 с.

9. **Арутюнян А.Г.** Расчет напряжения и потерь электроэнергии в сетях 0,38/0,22 кВ при несимметричных режимах. — Электричество, 2010, № 3, с. 65–67.

10. **Арутюнян А.Г.** Расчет параметров несимметричного режима трехфазных четырехпроводных сетей 0,38/0,23 кВ. — Промышленная энергетика, 2010, № 6, с. 36–38.

[20.03.15]

*Автор: Арутюнян Ашот Григорьевич окончил энергетический факультет Ереванского политехнического института в 1978 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение эффективно-*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 10, pp. 55–58.*

## About Calculating Additional Power Losses in Three-Phase Four-Wire Networks

**HARUTYUNYAN Ashot Grigor'yevich** (JSC «ENA», Yerevan, Armenia) — *Teacher of the sector «Training and retraining of personnel», Cand. Sci. (Eng.)*

*The question of active power losses in 0.23–0.24 kV electric networks operating with unbalanced load is considered. The problem is quite topical because a constantly growing number of domestic consumers have loads with a nonlinear volt-ampere characteristic. Electric energy losses are a constituent part of the tariff for electric power transmission, and their more accurate determination is also an important matter for the distribution network company. A procedure for determining additional active power losses in 0.4/0.23 kV three-phase four-wire electric networks is proposed that takes into account distortion and imbalance of phase voltages and currents. According to the existing procedure for determining losses in electric networks, these losses are calculated using a formula that does not take into account the losses in the neutral and phase wires with distorted phase voltage and current waveforms. With the proposed method, the losses are determined with reliable accuracy in any operating mode of 0.4/0.23 kV three-phase electric networks. Application of this method will make it possible to obtain more reliable assessment of additional active power losses in urban electric networks.*

**Key words:** *low-voltage networks, unbalanced load, active power losses*

#### REFERENCES

1. **Palmer D.** *Svetotekhnika — in Russ. (Light Engineering)*, 1996, No. 8, 21–27.
2. **Aizenberg Yu.B.** *Svetotekhnika — in Russ. (Light Engineering)*, 1996, No.5/6, pp. 20–23.
3. **Arutyunyan A.G.** *Izvestiya uchebnykh zavedenii i energo-ob'yedinenii SNG. Energetika — in Russ. (News of Higher Education Institutions and Power Systems of the Commonwealth of Independent States. Power Engineering)*. 2006, No. 4, pp. 40–44.
4. **Raitsel'skii L.A.** *Svetotekhnika — in Russ. (Light Engineering)*, 1993, No. 8, pp. 20–22.
5. **Klyuyev S.A.** *Svetotekhnika — in Russ. (Light Engineering)*, 1994, No. 9, pp. 24–25.
6. **Instruktsiya po raschetu i obosnovaniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam. Prikaz Minenergo Rossii ot 30 dekabrya 2008 g. No. 326, s izmeneniyami i dopolneniyami ot 1 fevralya 2010 g.** (An

*Instruction for Calculating and Substantiating Standard Process-Related Losses of Electric Energy during Its Transmission via Electric Networks. The Order of the RF Ministry for Energy No. 326 dated December 30, 2008 with amendments and supplements, dated February 1, 2010).*

7. **Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Ch. 1. Atabekov G.I. Lineinye elektricheskkiye tsepi.** (Theoretical principles of electrical engineering. Part 1. G.I. Atabekov. A Linear electric circuits). Moscow, Publ. Energiya, 1978, 592 с.

8. **Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov** (The losses of electric energy. Reactive power. Electric power quality. Guide for practical calculation). Moscow, Publ. ENAS, 2009, 456 p.

9. **Arutyunyan A.G. Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)**, 2010, No. 3, pp. 65–67.

10. **Arutyunyan A.G. Promyshlennaya energetika — in Russ. (Industrial Power Engineering)**, 2010, No. 6, pp. 36–38.

---

*сти производственных осветительных систем по дозе пульсации». Преподаватель сектора «Повышение квалификации и переподготовка кадров» ЗАО «ЭСА» (Ереван).*