

УДК 621.315

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ
НЕСИММЕТРИИ НА ПОТЕРИ
В СЕТИ 0,4 КВ**

*Смагин К. А., Галстян Р. А.,
Антонов М. А., Арнаутков А. В.*

Донской государственный технический
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

s_k_a_97@mail.ru

galstyan.razmik2015@yandex.ru

nevada@skillet.ru

ArnautovDonenergoMS@yandex.ru

Рассмотрено влияние несимметрии нагрузок 0,4 кВ городских сетей на потери электроэнергии. Установлено, что симметрия оказывает отрицательное воздействие на качество электроэнергии, а именно, способствует увеличению потерь электроэнергии в сети.

Ключевые слова: потери, несимметрия, электроэнергетика, напряжение, нагрузка, фаза.

UDC 621.315

**ANALYSIS OF ASYMMETRY EFFECT ON
LOSSES IN 0.4 KV NETWORK**

*Smagin K.A., Galstyan R.A.,
Antonov M.A., Arnautov A.V.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

s_k_a_97@mail.ru

galstyan.razmik2015@yandex.ru

nevada@skillet.ru

ArnautovDonenergoMS@yandex.ru

The article considers the influence of load asymmetry of 0.4 kV of urban networks on power losses. It is established that the symmetry has a negative impact on the quality of electricity, namely, contributes to the increase in power losses in the network.

Keywords: loss, asymmetry, electric power, voltage, load, phase.

Введение. Несимметрия напряжений наблюдается только в трёхфазной сети из-за неравномерного распределения нагрузок по фазам. Несимметрия напряжений увеличивает потери электроэнергии и негативно влияет на электрооборудование.

Анализ влияние несимметрии на потери в сети 0,4 кВ

Для анализа влияния несимметрии на потери рассмотрим участок магистральной сети 0,4 кВ с подключенными однофазными нагрузками. Представим небольшую улицу из 12 домов, например, в сельской местности. В первую очередь, составим три варианта потребления электроэнергии жилого дома. В дальнейшем каждый из 12 домов будет относиться к одному из трёх предложенных вариантов потребления электроэнергии.

Потребляемая мощность жилого дома для варианта «А» приведена в таблице 1.

Таблица 1

Вариант «А»

Наименование электроприемников	Установленная мощность P_n , кВт	Коэффициент спроса, K_c	Коэффициент использования, K_i	Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	Расчетная мощность			Коэффициент мощности на вводе в дом	Расчётный ток, А
					Активная P_p , кВт	Реактивная Q_p , кВАр	Полная S_p , кВА		
Электрическое освещение	2,5	0,8	0,6	1	1,20	0,00	1,20	0,93	56,52
Бытовая розеточная сеть	4,3		0,7	0,9	2,71	1,31	3,01		
Электрическая плита	5	0,8	1	1	4,00	0,00	4,00		
Холодильник	0,85	1	0,5	0,95	0,40	0,13	0,43		

Наименование электроприемников	Установленная мощность P_n , кВт	Коэффициент спроса, K_c	Коэффициент использования, $K_{и}$	Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	Расчетная мощность			Коэффициент мощности на вводе в дом	Расчётный ток, А
					Активная P_p , кВт	Реактивная Q_p , кВАр	Полная S_p , кВА		
Кондиционер	2,5	0,7	0,8	0,8	1,12	0,84	1,40		
Стиральная машина	2,2	1	0,6	0,8	1,06	0,79	1,32		
Персональный компьютер	1	0,6	1	1	0,60	0,00	0,60		
Домашний кинотеатр	0,8	0,6	1	1	0,48	0,00	0,48		
ИТОГО	19,15				11,57	3,08	12,44		

Вычислим расчётную активную мощность стиральной машины

$$P_p = P_c \cdot K_c \cdot K_{и} \quad (1)$$

$$P_p = 2,2 \cdot 1 \cdot 0,6 = 1,06 \text{ кВт}$$

Расчётную реактивную мощность стиральной машины вычислим по формуле

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

$$Q_p = 1,06 \cdot 0,75 = 0,79 \text{ кВАр}$$

Полную расчётную мощность стиральной машины вычислим по формуле

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi} \quad (3)$$

$$S_p = \frac{1,06}{0,8} = 1,32 \text{ ВА}$$

Расчётные мощности остальных электроприёмников вычисляются аналогичным способом. Далее вычисляем коэффициент мощности на вводе в жилой дом

$$\cos \varphi = \frac{\sum P_p}{\sum S_p} \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \frac{11,57}{12,44} = 0,93$$

Учитывая, что все нагрузки однофазные, на вводе в дом получим расчетный ток

$$I_p = \frac{\sum P_p}{U_n \cdot \cos \varphi} \quad (5)$$

$$I_p = \frac{11,57}{0,22 \cdot 0,93} = 56,52 \text{ А}$$

Сформируем и рассчитаем по формулам 1–5 ещё два варианта потребления электроэнергии жилого дома. Потребляемая мощность жилого дома варианта «Б» приведена в таблице 2.

Таблица 2

Вариант «Б»

Наименование электроприемников	Установленная мощность P_n , кВт	Коэффициент спроса, K_s	Коэффициент использования, K_i	Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	Расчетная мощность			Коэффициент мощности на вводе в дом	Расчётный ток, А
					Активная $P_{см}$, кВт	Реактивная $Q_{см}$, кВАр	Полная S , кВА		
Электрическое освещение	2,1	0,8	0,6	1	1,20	0,00	1,20	0,93	73,12
Бытовая розеточная сеть	4,1		0,7	0,9	2,71	1,31	3,01		
Электрическая плита	6	0,8	1	1	4,00	0,00	4,00		
Холодильник	0,85	1	0,5	0,95	0,40	0,13	0,43		
Кондиционер	2,5	0,7	0,8	0,8	1,12	0,84	1,40		
Стиральная машина	2,2	1	0,6	0,8	1,06	0,79	1,32		
Персональный компьютер	1	0,6	1	1	0,60	0,00	0,60		
Тёплые полы	2,5	0,5	1	1	1,25	-	1,25		
Бойлер	1,5	0,7	0,5	1	0,53	-	0,53		
Посудомоечная машина	2,2	0,8	0,8	0,8	1,13	0,84	1,41		
Домашний кинотеатр	0,8	0,6	1	1	0,48	0,00	0,48		
ИТОГО	19,55				14,95	3,86	16,09		

Потребляемая мощность жилого дома варианта «В» приведена в таблице 3.

Таблица 3

Вариант «В»

Наименование электроприемников	Установленная мощность P_n , кВт	Коэффициент спроса, K_s	Коэффициент использования, K_i	Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	Расчетная мощность			Коэффициент мощности на вводе в дом	Расчётный ток, А
					Активная $P_{см}$, кВт	Реактивная $Q_{см}$, кВАр	Полная S , кВА		
Электрическое освещение	1,8	0,8	0,6	1	1,20	0,00	1,20	0,93	44,96
Бытовая розеточная сеть	2,7		0,7	0,9	2,71	1,31	3,01		
Электрическая плита	4	0,8	1	1	4,00	0,00	4,00		
Холодильник	0,85	1	0,5	0,95	0,40	0,13	0,43		
Кондиционер	2,2	0,7	0,8	0,8	1,12	0,84	1,40		
Стиральная машина	2	1	0,6	0,8	1,06	0,79	1,32		
Персональный компьютер	1	0,6	1	1	0,60	0,00	0,60		
Домашний кинотеатр	0,8	0,6	1	1	0,48	0,00	0,48		
ИТОГО	15,35				9,19	2,42	9,89		

Таким образом, для примера были сформированы три варианта исполнения жилых домов. Варианты исполнения каждого дома приведены в таблице 4.

Таблица 4

Распределение домов

Номер дома	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вариант исполнения	А	В	В	Б	В	А	Б	В	А	В	А	Б

Симметрично распределим нагрузки по фазам питающей сети. Данные приведены в таблице 5.

Таблица 5

Нагрузки фаз в симметричном режиме

Фаза	А	В	С
Номер дома	2, 3, 4, 7	1, 5, 8, 12	6,9,10,11
Активная мощность, кВт	48,28	44,9	43,9
Реактивная мощность, кВАр	12,56	11,78	11,66

Магистральная линия выполнена проводом марки СИП4 4×95. Линия к дому выполнена проводом марки СИП4 2×16. Параметры проводов приведены в таблице 6.

Таблица 6

Параметры проводов

Марка	R _{пог} , Ом/км	X _{пог} , Ом/км	L, км
СИП4 4×95	0,411	0,082	0,2
СИП4 2×16	1,91	0,0754	0,01

Предположим, что напряжение каждой фазы в начале линии равно 240 В, тогда напряжение в конце линии приближенно рассчитаем по формуле:

$$U_{\text{кон}} = U_{\text{нач}} - U_Z \tag{6}$$

где $U_{\text{нач}}$ — напряжение в начале ветви;

U_Z — падение напряжения на сопротивлении, определяемое по формуле

$$U_Z = \Delta U_Z + j\delta U_Z = \frac{P_{\text{нач}} r + Q_{\text{нач}} x}{|U_{\text{нач}}|} + j \frac{P_{\text{нач}} x - Q_{\text{нач}} r}{|U_{\text{нач}}|} \tag{7}$$

где r и x — активное и индуктивное сопротивления линии, вычисляемое по формуле

$$r = R_{\text{пог}} \cdot L \tag{8}$$

$$x = X_{\text{пог}} \cdot L$$

Модуль напряжения в конце линии

$$U_{\text{кон}} = \sqrt{(U_{\text{нач}} - \Delta U_Z)^2 + (\delta U_Z)^2} \tag{9}$$

Рассчитаем падение напряжения фазы В по формуле 7

$$U_Z = \frac{44,9 \cdot 0,1013 + 0,017 \cdot 11,78}{0,24} + j \frac{44,9 \cdot 0,017 - 11,78 \cdot 0,1013}{0,24} = 19,79 - j0,00176 \cdot 10^{-3}$$

Рассчитаем модуль напряжения в конце линии по формуле 9

$$U_{\text{кон}} = \sqrt{(240 - 19,79)^2 + (0,0017 \cdot 10^{-3})^2} = 220,21 \text{ В}$$

Напряжения в конце линии для фаз А и С определяются аналогичным способом и равны 218,73 В и 220,64 В соответственно.

Линейные напряжения: $U_{\text{ав}}=380,1 \text{ В}$, $U_{\text{вс}}=381,8 \text{ В}$, $U_{\text{са}}=380,5 \text{ В}$.

Рассчитаем токи, протекающие в каждой линии по формуле 5. $I_{\text{а}}=235,97 \text{ А}$; $I_{\text{в}}=219,45 \text{ А}$; $I_{\text{с}}=214,57 \text{ А}$.

Потери электроэнергии в линии 0,4 кВ (от % отпуска электроэнергии в сеть) определяются по формуле

$$\Delta W_{\%} = 0,7 \cdot K_{\text{нер}} \cdot \Delta U \cdot \frac{\tau}{T_{\text{max}}} \quad (10)$$

где $K_{\text{нер}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузок по фазам [1]; ΔU — потери напряжения в максимум нагрузки сети от шин ТП до наиболее электрически удаленного электроприемника, %; τ — число часов наибольших потерь мощности; T_{max} — число часов использования максимальной нагрузки.

Принимаем $T_{\text{max}}=3000$

Коэффициент неравномерности $K_{\text{нер}}$ определяется по формуле [2]

$$K_{\text{нер}} = 3 \cdot \frac{I_{\text{а}}^2 + I_{\text{в}}^2 + I_{\text{с}}^2}{(I_{\text{а}} + I_{\text{в}} + I_{\text{с}})^2} \quad (11)$$

$$K_{\text{нер}} = 3 \cdot \frac{235,97^2 + 219,45^2 + 214,57^2}{(235,97 + 219,45 + 214,57)^2} = 1$$

Рассчитаем средний процент потерь напряжения ΔU

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_{\text{ср.н}}} \cdot 100 \quad (12)$$

$$\Delta U = U_{\text{ср.н}} - U_{\text{ср.к}} \quad (13)$$

$$\Delta U = 240 - \frac{218,73 + 220,21 + 220,64}{3} = 20,14 \text{ В}$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{20,14}{240} \cdot 100 = 8,39 \%$$

Рассчитаем число часов наибольших потерь мощности τ

$$\tau = \frac{k_3 + 2k_3^2}{3} \cdot 8760 \quad (14)$$

$$\tau = \frac{0,342 + 2 \cdot 0,342^2}{3} \cdot 8760 = 1684,93$$

где k_3 — коэффициент заполнения годового графика $k_3 = \frac{T_{\text{max}}}{8760} = 0,342$

Рассчитаем потери электроэнергии в линии 0,4 кВ по формуле 10

$$\Delta W_{\%} = 0,7 \cdot 1 \cdot 8,39 \cdot \frac{1684,93}{3000} = 3,3 \%$$

Определим коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{\text{Л}}} \cdot 100\% \quad (15)$$

где $U_{2(1)}$ — значение напряжения обратной последовательности, приближенно может быть определено по следующей формуле

$$U_{2(1)} = 0,62 \cdot (U_{\text{нб}} - U_{\text{нм}}) \quad (16)$$

$$U_{2(1)} = 0,62 \cdot (381,8 - 380,1) = 1,05 \text{ В}$$

где $U_{\text{нб}}$, $U_{\text{нм}}$ — наибольшее и наименьшее значения междуфазных напряжений

Рассчитаем коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{1,05}{380} \cdot 100\% = 0,3 \%$$

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{\text{Ф}}} \cdot 100\% \quad (17)$$

где $U_{0(1)}$ — значение напряжения нулевой последовательности, приближенно может быть определено по следующей формуле

$$U_{0(1)} = 0,62 \cdot (U_{\text{нб}} - U_{\text{нм}}) \quad (18)$$

$$U_{0(1)} = 0,62 \cdot (220,64 - 218,73) = 1,18 \text{ В}$$

где $U_{\text{нб}}$, $U_{\text{нм}}$ — наибольшее и наименьшее значения фазных напряжений.

Рассчитаем коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

$$K_{0U} = \frac{1,18}{220} \cdot 100\% = 0,53 \%$$

Значения коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям менее 2 %, что является нормально допустимым [3].

Далее неравномерно распределим нагрузку по фазам, тем самым создав несимметрию напряжений [4].

Таблица 7

Нагрузки фаз при несимметричном режиме

Фаза	А	В	С
Номер дома	7, 8, 10, 11, 12	1, 4, 6, 9	2, 3, 5
Активная мощность, кВт	59,85	49,66	27,57
Реактивная мощность, кВАр	14,85	13,1	7,25

По формуле 9 определим напряжения в конце линии. Результаты сведены в таблицу 8.

Напряжения в конце линии

Фаза	А	В	С
Укон, В	213,69	218,11	227,85

Линейные напряжения: $U_{ав}=382,44$ В, $U_{вс}=373,95$ В, $U_{са}=386,24$ В.

Токи, протекающие в каждой линии, рассчитаем по формуле 5. $I_a=292,52$ А; $I_b=242,72$ А; $I_c=134,75$ А.

Найдем потери электроэнергии в линии 0,4 кВ с учетом неравномерной загрузки фаз по формуле 10.

$$\Delta W_{\%} = 0,7 \cdot 1,09 \cdot 8,39 \cdot \frac{1684,93}{3000} = 3,6 \%$$

Коэффициент неравномерности $K_{нер}$ определен по формуле 12.

Определим коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности по формулам 15 и 16.

$$U_{2(1)} = 0,62 \cdot (386,24 - 373,95) = 7,62 \text{ В}$$

$$K_{2U} = \frac{7,62}{380} \cdot 100\% = 2 \%$$

Значение K_{2U} при несимметричном режиме составляет 2%, что является нормально допустимым.

Рассчитаем коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности по формулам 17 и 18.

$$U_{0(1)} = 0,62 \cdot (227,85 - 213,69) = 8,78 \text{ В}$$

$$K_{0U} = \frac{8,78}{220} \cdot 100\% = 4 \%$$

Значение K_{0U} при несимметричном режиме составляет 4%, что является максимально допустимым значением.

Полученные результаты расчётов как для симметричного, так и для несимметричного режима приведены в таблице 9.

Таблица 9

Сравнение симметричного и несимметричного режимов

При симметричной нагрузке фаз													
Активная Мощность, кВт			Токи в фазах, А			Напряжения в конце линии, В			ΔU , %	$K_{неp}$	K_2	K_{0U}	ΔW , %
А	В	С	А	В	С	А	В	С					
48,28	44,9	43,9	235,97	219,45	214,57	218,73	220,21	220,64	8,39	1	0,3	0,53	3,3
При несимметричной нагрузке фаз													
59,85	49,66	27,57	292,52	242,72	134,75	213,69	218,11	227,85	8,39	1,08	2	4	3,6

Заключение. Исходя из данных сформированной таблицы можно сделать вывод, что несимметрия оказывает отрицательное воздействие на качество электроэнергии, а именно,

способствует увеличению потерь электроэнергии в сети. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям в несимметричном режиме также увеличились, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей, а также негативным образом сказывается на электрических машинах, т.е. приводит к значительному снижению срока их службы.

Библиографический список

1. Методические рекомендации по определению потерь электрической энергии в городских сетях напряжением 10(6)-0,4 кВ. — Введ. 2001-04-23. — Москва : Госстрой России, 2001. — 61 с.
2. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчётов / Ю. С. Железко. — Москва : ЭНАС, 2029. — 456 с.
3. Правила устройства электроустановок [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс. — Режим доступа : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=98464&fld=134&dst=100005,0&rnd=0.717993052422657#02749113884386629> (режим доступа :15.04.2020).
4. Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисович. — Москва : Издательство НЦ ЭНАС, 2006. — 350 с.