

Т.С. ГНУНИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0.38/0.22 кВ АРМЕНИИ

Исследованы величины коэффициентов, характеризующих суточные графики нагрузки в электрических сетях 0.38/0.22 кВ Армении. На основе данных натурных измерений режимных параметров головных участков трехфазных магистральных линий электроснабжения сетей 0.38/0.22 кВ Армении сформированы выборки, состоящие из характеризующих суточные графики нагрузки коэффициентов и сгруппированные по признакам сезонности, типа населенных пунктов, состава потребителей. На основе статистического анализа выборок получены теоретические законы их распределения и определены уточненные значения коэффициентов неравномерности.

Ключевые слова: коэффициенты, натурные измерения, электрические сети, статистический анализ, закон распределения.

Объем отпущенной потребителям электроэнергии в электросетях 0.38/0.22 кВ за отчетный месяц определяется в Армении на основе единовременного считывания показаний счетчиков активной энергии в течение первого календарного дня последующего месяца, что позволяет рассчитать среднее значение тока нагрузки I_{cp} . Однако величина потерь электроэнергии зависит также от характера потребления. В соответствии с известными подходами [1, 2] и “Методикой расчета технологических потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0.38-35 кВ” [3], утвержденной Комиссией по регулированию общественных услуг РА, расчет нагрузочных потерь электроэнергии в элементах электрических сетей 0.38/0.22 кВ осуществляется по формуле

$$\Delta W = K(I_{cp}^2 R)T, \quad (1)$$

где K - коэффициент неравномерности графика нагрузки; I_{cp} - среднее значение тока нагрузки; R - активное сопротивление элемента электрической сети; T - длительность расчетного периода.

Коэффициент неравномерности представляет собой произведение трех составляющих, приближенные значения которых, в соответствии с указанной выше методикой [3], определяются на основе данных натурных измерений по формулам

$$K = K_1 K_2 K_3, \quad (2)$$

$$K = \frac{3n}{D} \sum_{i=1}^n (I_{Ai}^2 + I_{Bi}^2 + I_{Ci}^2 + FI_{Ni}^2), \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{n}{D} \sum_{i=1}^n (I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci})^2, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{3n^2}{D} (I_{Acp}^2 + I_{Bcp}^2 + I_{Ccp}^2 + FI_{Ncp}^2), \quad (5)$$

$$D = \left[\sum_{i=1}^n (I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci}) \right]^2, \quad (6)$$

где $n = T / \Delta t$ - число измерений за расчетный период T при заданном шаге дискретизации измерений Δt ; I_A, I_B, I_C - значения фазных токов; I_N - значение тока в нейтральном проводе; i - индекс, указывающий на значение тока в i -ом измерении; cp - индекс среднего значения тока за расчетный период; $F = R_N / R_\phi$ - отношение сопротивлений нейтрального R_N и фазного R_ϕ проводов; $K_1 = K_\phi^2$ - коэффициент, учитывающий форму кривой графика нагрузки K_ϕ ; K_2 - коэффициент, учитывающий уровень фазной несимметрии; K_3 - коэффициент, учитывающий изменение уровня фазной несимметрии во времени.

Кроме приведенных выше коэффициентов, графики нагрузки характеризуются также коэффициентами заполнения $k_{зап}$, несимметрии токов k_2 , неуровновешенности линейных токов k_0 и неравномерности загрузки фаз k_3 , величины которых определяются по формулам [4]

$$k_{зап} = \frac{P_{cp}}{P_{max}}, \quad (7)$$

$$k_2 = \left| \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|, \quad (8)$$

$$k_0 = \left| \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1} \right|, \quad (9)$$

$$k_3 = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2}{(I_A + I_B + I_C)^2}, \quad (10)$$

где P_{cp} и P_{max} - средняя и максимальная мощности графика нагрузки соответственно; I_1, I_2, I_0 - токи прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Коэффициент неравномерности является интегральным показателем характера потребления электроэнергии в сетях 0.38/0.22 кВ, и выбору его значения необходимо уделять особое внимание, поскольку, в конечном итоге, он определяет точность результатов расчета потерь электроэнергии. Кроме

того, в ходе разработки рекомендаций по снижению потерь возникает необходимость анализа величин некоторых из приведенных выше коэффициентов.

Целью настоящей статьи является исследование величины коэффициентов, характеризующих графики нагрузки.

С 1998г. ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики” проводит приборные измерения суточных графиков нагрузки электрических сетей 0.38/0.22 кВ Армении. По результатам этих измерений сформирована база данных, включающая режимные параметры графиков нагрузок рабочих дней для 545 головных участков трехфазных магистральных линий (ГУТМЛ) электроснабжения.

Для статистической обработки полученных выборок нами разработан [5] и реализован следующий алгоритм:

- Из располагаемой базы данных с учетом выражений (2)-(10) сформированы выборки, состоящие из 437 элементов каждого из коэффициентов, характеризующих графики нагрузки, для региональных электросетей, и из 208 элементов – для электросетей г. Еревана.

- Элементы выборок представлены в виде вариационного ряда. Корректность выбора числа и ширины интервалов вариационного ряда обеспечена использованием формулы Стерджеса [6].

- Определены статистические характеристики вариационного ряда, а именно – среднее арифметическое элементов выборки $\bar{X}$ и среднее квадратическое отклонение s .

- В соответствии с характером распределения эмпирических частот $F(x)$ рассмотрены две альтернативные гипотезы о теоретическом законе распределения элементов выборки. В соответствии с первой гипотезой принято предположение о нормальном законе распределения $F_n(x)$ с состоятельной оценкой s_n , а в соответствии со второй – предположение о логнормальном законе распределения $F_{лн}(x)$ с состоятельной оценкой $s_{лн}$.

- Проверка соответствия эмпирического распределения $F(x)$ принятым выше гипотезам о теоретическом законе распределения осуществлена с использованием критерия Колмогорова [6] λ_α , справочное значение которого принято на уровне значимости $\alpha=0,05$. Для каждой i -й гипотезы о теоретическом законе распределения определены значения $D_i = \max|F_i(x) - F(x)|$ и $\lambda_i = D_i \sqrt{n}$.

- Проверка согласованности теоретического закона распределения с опытными данными осуществлена на основе выполнения условия $\lambda_i < \lambda_{\alpha=0,05}$. Если данному условию удовлетворяют обе альтернативные гипотезы, то окончательный выбор осуществлен в пользу теоретического распределения с меньшим значением λ .

Проведенный статистический анализ позволил выявить следующие закономерности:

1. Вариационные ряды коэффициентов $k_{\text{зап}}$, k_2 и k_0 соответствуют нормальным законам распределения, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики нормального закона распределения

Коэффициент	Сезон	г. Ереван		Регионы	
		M(x)	D(x)	M(x)	D(x)
$k_{\text{зап}}$	лето	0,525	0,0083	0,449	0,0062
	зима	0,572	0,0076	0,570	0,0092
k_2	лето	0,231	0,0	0,300	0,0
	зима	0,214	0,0	0,330	0,0
k_0	лето	0,232	0,0	0,293	0,0
	зима	0,210	0,0	0,311	0,0

2. Вариационные ряды коэффициентов K , K_1 , K_2 , K_3 и k_3 соответствуют логнормальным законам распределения, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики логнормального закона

Коэф- фи- циент	Се-зон	г. Ереван				Регионы			
		Me(x)	Mo(x)	M(x)	D(x)	Me(x)	Mo(x)	M(x)	D(x)
K	лето	1,490	1,447	1,513	0,069	1,633	1,554	1,674	0,142
	зима	1,405	1,366	1,425	0,058	1,508	1,425	1,552	0,141
K_1	лето	1,147	1,140	1,151	0,009	1,204	1,195	1,209	0,011
	зима	1,154	1,148	1,158	0,007	1,154	1,141	1,160	0,015
K_2	лето	1,244	1,216	1,258	0,002	1,297	1,245	1,323	0,012
	зима	1,189	1,163	1,202	0,002	1,284	1,227	1,313	0,011
K_3	лето	1,044	1,044	1,045	0,001	1,046	1,044	1,046	0,002
	зима	1,024	1,023	1,024	0,001	1,019	1,018	1,019	0,001
k_3	лето	0,447	0,435	0,452	0,005	0,464	0,443	0,475	0,011
	зима	0,426	0,411	0,434	0,007	0,459	0,432	0,473	0,014

Анализ значений коэффициентов, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет прийти к ряду важных заключений. В частности:

1. Известно, что причиной возникновения несимметрии в ГУТМЛ могут являться как амплитудная, так и фазовая несимметрии. Из табл. 1 видно, что значения математических ожиданий $M(k_2)$ и $M(k_0)$ в отдельных подгруппах (г. Ереван и регионы) и для различных сезонов приблизительно равны. В соответствии с теоретическими исследованиями [4] это означает практическое отсутствие фазовой несимметрии.

2. В летний сезон значение коэффициента заполнения графика нагрузки $k_{\text{зап}}$ существенно выше для г. Еревана по сравнению с регионами. В зимний сезон отмечается рост $k_{\text{зап}}$, причем в большей степени - в региональных электросетях. Несмотря на это, коэффициент формы кривой $K_\phi = \sqrt{K_1}$ в

зимний сезон незначительно увеличивается в г.Ереване и уменьшается в регионах. Это означает, что “уплотнение” суточного графика нагрузки в г.Ереване происходит преимущественно за счет увеличения продолжительности пиковой части графика нагрузки, а в регионах – за счет заполнения ночного провала.

3. Учет логнормального закона распределения коэффициентов K , K_1 , K_2 , K_3 и k_3 приводит к смещению наиболее вероятного их значения от медианы $Me(X)$ к моде $Mo(X)$, т.е. в сторону более низких значений.

4. Режимы электропотребления как в регионах, так и в г.Ереване характеризуются значительным уровнем несимметрии. Анализ значений коэффициентов K_2 и k_3 показывает, что уровень несимметрии в г.Ереване ниже, чем в регионах. Наблюдается тенденция к незначительному снижению уровней несимметрии в зимний сезон.

5. Наконец, анализ значений интегрального показателя K характера потребления электрической энергии в сетях 0.38/0.22 кВ показывает, что суточные графики нагрузки в регионах характеризуются более высоким уровнем неравномерности, чем в г.Ереване, независимо от сезона. Наблюдается снижение значений коэффициентов неравномерности в зимний период, что обусловлено “уплотнением” графиков нагрузки и некоторым снижением уровней фазной несимметрии.

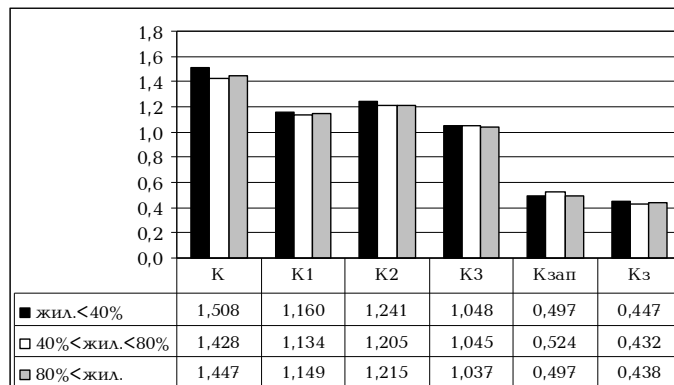
Аналогичный подход применен к выборкам, сформированным с учетом состава потребителей, а именно – объема потребления электроэнергии абонентами жилищного сектора. Результаты анализа представлены на рис. 1 и 2.

Анализ значений коэффициентов, приведенных на рис. 1 и 2, позволяет прийти к следующим выводам:

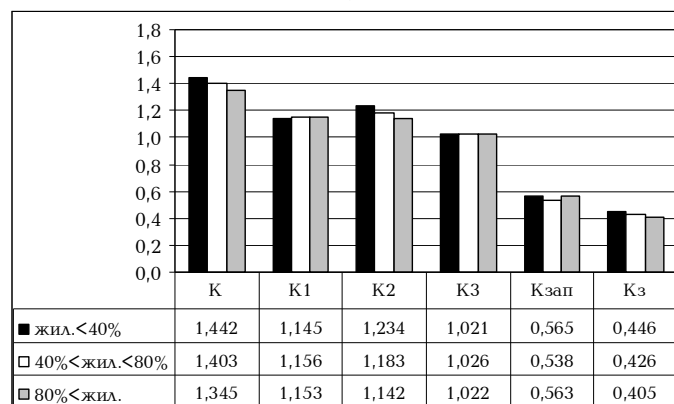
1. Вариационные ряды коэффициентов $k_{\text{зап}}$ соответствуют нормальному закону распределения, а коэффициентов K , K_1 , K_2 , K_3 и k_3 – логнормальному, т.е. наиболее вероятные значения последних следует смещать к моде $Mo(x)$.

2. Значение коэффициента заполнения графика нагрузки претерпевает незначительные изменения в зависимости от состава потребителей, однако оно выше для зимнего сезона по сравнению с летним, т.е. зимой имеет место “уплотнение” графиков нагрузки.

3. Коэффициент формы кривой K_1 имеет тенденцию к увеличению по мере увеличения объема электропотребления абонентами жилищного сектора практически в обоих сезонах как в регионах, так и в г.Ереване. Это обусловлено, прежде всего, характерным для жилищного сектора увеличением продолжительности электропотребления в вечерние часы, т.е. увеличением “пиковой” зоны графика нагрузки.

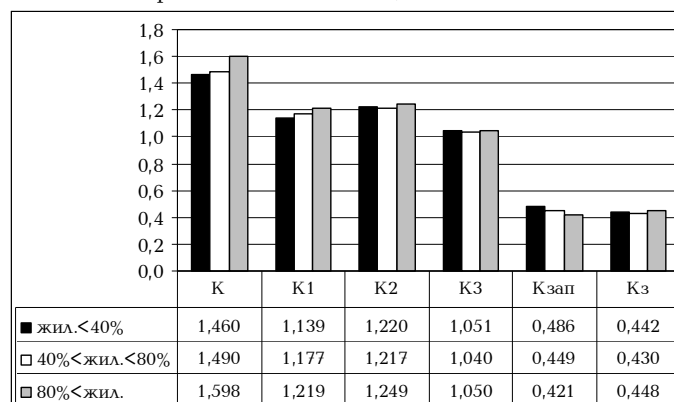


а)

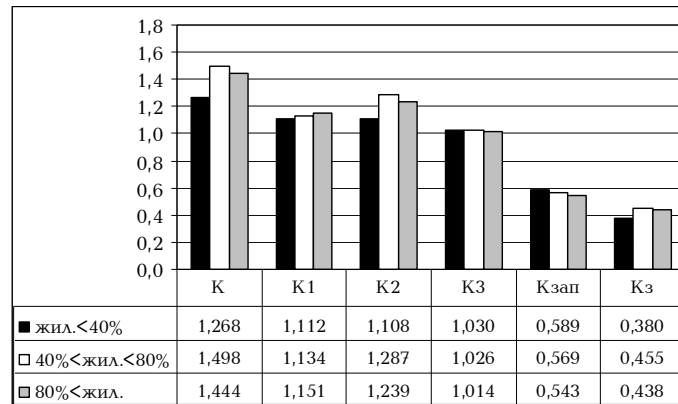


б)

Рис. 1. Коэффициенты, характеризующие суточные графики нагрузок
г. Еревана: а - летний сезон; б - зимний сезон



а)



б)

Рис. 2. Коэффициенты, характеризующие суточные графики нагрузок регионов: а - летний сезон; б - зимний сезон

4. Значение коэффициента K_2 имеет тенденцию к снижению по мере увеличения объема электропотребления абонентами жилищного сектора в г. Ереване. В большей степени это характерно для зимнего сезона, когда “симметрирование” нагрузки в г. Ереване обусловлено массовым использованием жилищными потребителями электроэнергии в целях отопления. Для суточных графиков регионов характерно увеличение уровня несимметрии при увеличении доли потребления жилищным сектором, причем в зимний сезон такое увеличение имеет место в большей мере. В отличие от традиционного мнения [1, 4] о снижении уровня несимметрии при увеличении степени распределенности нагрузки по длине линии, следует признать, что для регионов Армении это не характерно. Здесь, в отличие от г.Еревана, использование электроэнергии для отопления и приготовления горячей воды не носит массового характера и доступно ограниченным слоям населения. Это приводит к тому, что отрицательный эффект неравномерной загрузки фаз превалирует над эффектом распределенности нагрузки. К тем же выводам позволяет прийти анализ значений коэффициента неравномерности загрузки фаз k_3 .

5. Поведенческие свойства коэффициента неравномерности K для графиков нагрузки регионов и г.Еревана имеют различную тенденцию. Для г.Еревана по мере увеличения доли потребления абонентами жилищного сектора значение K уменьшается, причем в большей мере это имеет место в зимний сезон. Для регионов наоборот - значение K имеет тенденцию к увеличению. Такие поведенческие свойства обусловлены причинами, изложенными в пункте 4.

Выводы

1. На основе данных натурных измерений режимных параметров головных участков трехфазных магистральных линий электроснабжения сетей 0.38/0.22 кВ Армении сформированы выборки, состоящие из коэффициентов, характеризующих суточные графики нагрузки. Выборки сгруппированы по признакам сезонности, типа населенных пунктов, состава потребителей.
2. Указанные выборки подвергнуты статистическому анализу, на основе которого проверены гипотезы о теоретическом законе их распределения.
3. Проведен развернутый анализ тенденций изменения коэффициентов, характеризующих сгруппированные по признакам суточные графики нагрузки.
4. Определены уточненные значения коэффициентов неравномерности K для сгруппированных по признакам графиков нагрузок. Уточненные значения K оказались смещенными к моде логнормального распределения, т.е. в сторону меньших значений. Использование уточненных коэффициентов обеспечит повышение точности результатов расчетов технических потерь электроэнергии в электрических сетях 0.38/0.22 кВ, а их группирование по признакам - реализацию принципов дифференцированного подхода.
5. В сетях 0.38/0.22 кВ Армении основной потенциал снижения технических потерь электроэнергии заключен в симметрировании режимов нагрузок фаз. Основное внимание при этом следует уделять вопросам снижения уровня амплитудной несимметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В.** Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в сетях: Руководство для практических расчетов. –М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003. – 280с.
2. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Под ред. **В.Н. Казанцева**. –М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Методика расчета технологических потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0.38-35 кВ / Утверждена решением Комиссии по регулированию секторов общественных услуг РА № 65а от 8 октября 2002г.
4. **Троицкий А.И.** Уравновешивание токов нулевой последовательности: Монография / Юж.-Рос. гос. тех. ун-т. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. - 170 с.
5. **Гнуни Т.С.** Исследование величины коэффициента неравномерности графика нагрузки в электрических сетях 0.4 кВ Армении// Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). -2005. -No 6. - С. 13-20.
6. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. –М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. –543 с.

ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики” РА. Материал поступил в редакцию 19.06.2006.

S.U. ԳՆՈՒՆԻ

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ 0.38/0.22 կՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ՕՐԱԿԱՆ ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ
ԳՐԱՖԻԿՆԵՐԸ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՂ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ**

Հետազոտված են Հայաստանի 0.38/0.22 կՎ էլեկտրական ցանցերի օրական բեռնվածքի գրաֆիկները բնութագրող գործակիցները: Հայաստանի 0.38/0.22 կՎ էլեկտրամատակարարման եռաֆազ մագիստրալ գծերի գլխամասային հանգույցների ռեժիմային հարաչափերի փաստացի չափումների տվյալներով ձևավորվել են ընտրաքանակներ, որոնք բաղկացած են օրական բեռնվածքի գրաֆիկները բնութագրող գործակիցներից և խմբավորված են ըստ սեզոնայնության, Երևանի և տարածաշրջանների, սպառողների կազմի հատկանիշներով: Ընտրաքանակների վիճակագրական վերլուծության հիման վրա բացահայտվել են դրանց բաշխման տեսական օրենքները և որոշվել են անհավասարաչափության գործակիցների ճշտգրված մեծությունները:

Առանցքային բառեր. գործակից, բնական չափումներ, էլեկտրական ցանցեր, վիճակագրական վերլուծություն, բաշխվածության օրենք:

T.S. GNUNI

**INVESTIGATION OF COEFFICIENT VALUES CHARACTERIZING THE DAILY LOAD CURVE IN
0.38/0.22 kV NETWORK OF ARMENIA**

The values of coefficients characterizing the daily load curve in 0.38/0.22 kV network of Armenia are investigated. On the basis of data received from onsite measurements of regime parameters in head district of the Armenian 0.38/0.22 kV electricity supply three-phase main lines, the selections have been formed. The selections consisted of coefficients characterizing the daily load curve and grouped according to seasonal, settlement type, consumer structure principles. On the basis of selections' statistical analysis, the theoretical distribution function is derived and adjusted values of irregularity coefficients are evaluated.

Keywords: coefficients, in-situ measurements, electric network, statistical analysis, distribution law.