

УДК 621.31

**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ
ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ РАСЧЕТА НАГРУЗОК**

Канд. техн. наук АРУТЮНЯН А. Г.

Белорусский государственный экономический университет (Бобруйский филиал)

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

Широкое применение в промышленности и быту устройств с нелинейными вольт-амперными характеристиками из-за одновременного изме-

нения графиков нагрузки и неравномерного распределения однофазных потребителей по фазам приводит к нарушению допустимых значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в ЭС.

Практика эксплуатации ЭС 0,4/0,23 кВ показывает, что чаще нарушается ПКЭ по отклонению и симметрии фазного напряжения.

Нарушения допустимых значений ПКЭ, как следствие, приводят к ухудшению технико-экономических показателей электроснабжающих организаций и электроприемников [2]. Измерения, проведенные на десяти ТП-10/0,4 кВ, показали, что трехфазная четырехпроводная система 0,4/0,23 кВ из-за неравномерного распределения однофазных потребителей и неодновременного изменения нагрузки по фазам *A, B, C* работает в несимметричном режиме (рис. 1).

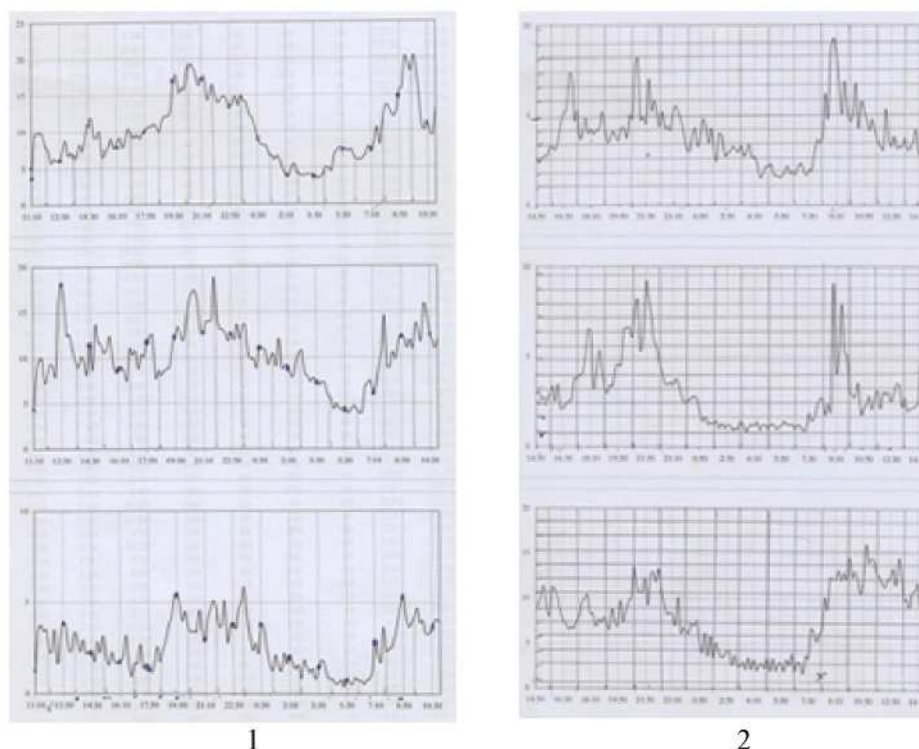


Рис. 1. Суточный график активной нагрузки магистральных линий

Результаты измерений на одной подстанции ТП-10/0,4 кВ, $S_{\text{ном}} = 400$ кВ·А, приведены в табл. 1, однолинейная схема этой воздушной магистральной линии – на рис. 2.

Коэффициент несимметрии $K_{\text{он}}$ по нулевой последовательности, рассчитанный согласно ГОСТ13109–97, для этой подстанции составил 9,5 %. По ГОСТ допустимая величина $K_{\text{он}}$ для ЭС 0,4/0,23 кВ нормирована соответственно: нормально допустимое значение $K_{\text{он}} = 2$ %, предельно допустимое значение $K_{\text{он}} = 4$ %.

Из-за несимметричного режима работы ЭС 0,4/0,23 кВ возникают дополнительные потери активной мощности (табл. 1):

- в сетевом трансформаторе ($P_{\text{хх}}, P_{\text{кз}}$, гр. 17);
- в нейтральном проводе (гр. 18);
- в магистральных линиях электропередачи (гр. 19).

	1		Обозначение фазы
	2		Измеренные фазные полные мощности $S_{\text{ф}}$ кВ·А
	3		Измеренные фазные активные мощности $P_{\text{ф}}$ кВт
	4		Измеренные фазные реактивные мощности $Q_{\text{ф}}$ квар
	5		Измеренные фазные токи $I_{\text{ф}}$ А
	6		Измеренные линейные и фазные напряжения $U_{\text{лид}}/U_{\text{фд}}$ В
	7		Напряжение нейтрального провода $U_{\text{н}}$ В
	8		Измеренная и расчетная величины тока нейтрального провода $I_{\text{н}}$ А
	9		Расчетные величины фазных токов на стороне ВН, А
	10		Расчетные величины линейных и фазных напряжений на стороне ВН, кВ
	11		Расчетная величина напряжения нулевой последовательности на стороне ВН $U_{\text{о}}$ В
	12		Коэффициент формы напряжений фаз, о. е.
1,05	13		Номинальное значение потерь в трансформаторе $P_{\text{л}}$, кВт
	14		Фактическое значение $P_{\text{хх}}$ в трансформаторе, кВт
	15		Потери от вихревых токов в $P_{\text{хв}}$ при нормальном режиме, кВт
	16		Увеличение $P_{\text{хх}}$ в зависимости от фактических значений фазных напряжений, кВт
1,702	17		Фактическое значение $P_{\text{хх}}$ по фазам трансформатора при несимметричном режиме работы, кВт
	18		Величины дополнительных потерь полной и активной мощности в нейтральном проводе $S_{\text{д}}/P_{\text{н}}$ кВ·А/кВт
	19		Дополнительные потери активной мощности в линейных проводах и увеличение мощности электроприемников при несимметричном режиме $\Delta P_{\text{л}}/\Delta P_{\text{лф}}$ кВт
Σ	160,3	158,1	23,5
A	36,8	35,4	10
B	56,6	56,4	4,5
C	66,9	66,3	9
		282	
		427/250	
		431/235	
		44	
		113/118	
		7,32	
		10,6/6,13	
		8,9	
		10,3/5,96	
		11,05/6,39	
		346	
		1,247	
		0,35	
		0,4	
		0,22	
		0,06	
		0,46	
		5,2/5,17	
		2,1/4,76	

Таблица 1

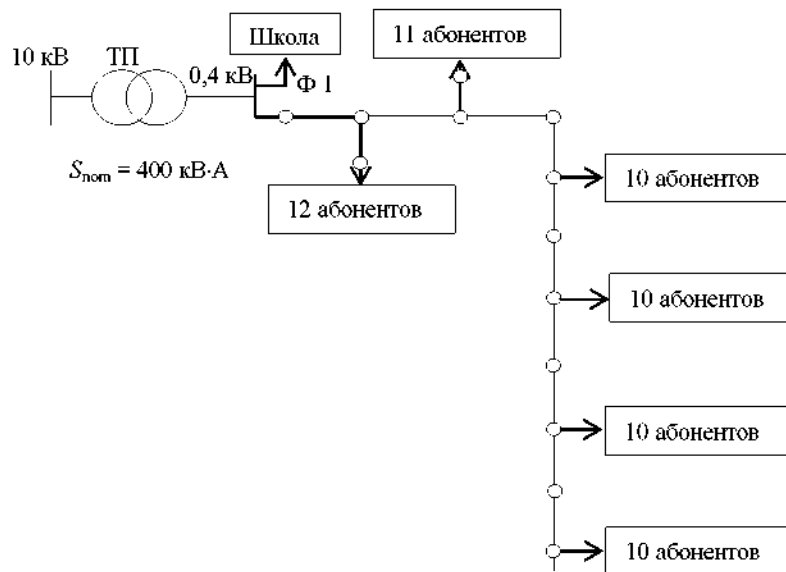


Рис. 2. Принципиальная однолинейная схема воздушной магистральной линии 1

Если сравнить графики нагрузок из [3] и снятые данные в 2003–2005 гг. (рис. 1), то видно, что последние – более неравномерны. Причиной, на наш взгляд, являются увеличение установленной мощности и изменения характера электрических нагрузок от однофазных электроприемников, применяемых в быту в последние годы:

- компактные люминесцентные лампы с нелинейными вольт-амперными характеристиками;
- разнообразная по назначению и электрической мощности бытовая техника и др.

Сегодня известны две методики симметрирования электрических нагрузок по фазам A , B , C . Первая методика изложена в [4], ее суть заключается в равномерном распределении средних нагрузок за наиболее загруженную смену от одно- и трехфазных электроприемников.

Вторая методика разработана в ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» РА. Основа для равномерного распределения электрических нагрузок при этом методе – величина средней нагрузки за месяц. Практика симметрирования в трехфазных четырехпроводных ЭС показывает, что при однотипных электроприемниках (абонентах) и их числе $n_A = n_B = n_C > 10$ шт. данная методика дает удовлетворительный результат.

Симметрирование электрических нагрузок в городских ЭС 0,4/0,23 кВ по фазам особенно трудно, и положительный эффект отсутствует при малом количестве электроприемников (абонентов). Например, когда число однофазных абонентов на каждой фазе $n_A = n_B = n_C = 4 < 10$ шт.

Целью работы является разработка методики расчета оптимального количества однофазных электроприемников на каждую фазу для симметричного режима работы трехфазных четырехпроводных ЭС 0,4/0,23 кВ.

Анализ графиков (рис. 1) электрических нагрузок в ЭС 0,4/0,23 кВ и результаты работы [3] показывают, что в течение суток (месяца, года) по-

ребление электроэнергии из городских ЭС имеет периодический характер. Это свойство позволяет графики электрических нагрузок считать стационарными и независимыми, что дает возможность при расчете электрических нагрузок и других показателей режима трехфазных четырехпроводных ЭС 0,4/0,23 кВ применять статистический метод расчета [4].

Для трех магистральных линий, в том числе приведенных на рис. 1, рассчитаны величины фазных электрических нагрузок: средняя $P_{\text{ср}}$, эффективная $P_{\text{э}}$, расчетная $P_{\text{р}}$ и среднеквадратичное отклонение нагрузок σ (табл. 2).

Величины P_{AC} , P_{BC} , P_{CC} определены из графика нагрузки по формуле

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_T}{m}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_T$ – текущие значения фазных нагрузок; m – число выборок.

В качестве величины генерального среднего значения нагрузки в расчетах принята величина

$$\overline{P}_{\text{ср}} = \frac{P_{AC} + P_{BC} + P_{CC}}{3}, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Из графиков нагрузки определены средние значения дисперсии

$$DP_{\phi} = \frac{DP_1 + DP_2 + \dots + DP_m}{m}, \text{ кВт}^2. \quad (3)$$

Эффективное значение нагрузки [4]

$$P_{\text{эф}} = \sqrt{P_{\text{ср}}^2 + DP_{\text{ср}}}, \text{ кВт}. \quad (4)$$

Среднеквадратичное отклонение для каждой фазы определено по формуле

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{DP_{\phi}}, \text{ кВт}. \quad (5)$$

Анализ полученных результатов показывает, что величины фазных значений σ_{ϕ} составляют 50–100 % от величины $P_{\text{ср}}$, и, естественно, в таких случаях без учета σ_{ϕ} при симметрировании трехфазных четырехпроводных ЭС не дает удовлетворительных результатов. Это подтверждает практика симметрирования трехфазных четырехпроводных ЭС.

Известно [4], что при числе электроприемников, в нашем случае абонентов, $n_{\phi} > 4-5$ графики нагрузок подчиняются нормальному закону распределения. В этом случае плотность вероятности распределения нагрузок

$$W(P_T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_T - P_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \text{ о. е.}, \quad (6)$$

где P_T – текущее значение активной нагрузки, кВт.

Таблица 2

Расчетная величина	Номер линии	Магистральная линия № 1			Магистральная линия № 2			Магистральная линия № 3		
		Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Средняя величина фазных нагрузок $P_{фр}$, кВт		9,77	10,4	2,8	3,84	3,43	8,62	13	16,3	18,4
Дисперсия графиков нагрузок $DP_{ф}$, кВт ²		67,7	59	7,42	9,54	12,55	58	22,95	10,5	20,6
Среднеквадратичное отклонение графиков нагрузок σ , кВт		8,23	7,7	2,7	3,1	3,54	7,62	4,8	3,2	4,54
Плотность вероятности распределения графика нагрузки $W(P_{\Sigma})$, о. е.		0,687	0,671	0,846	0,654	0,695	0,611	0,455	0,681	0,52
Коэффициент несимметрии графиков нагрузок K_{Σ}		0,697	0,91	-0,75	-0,091	-0,272	1,88	3	2,17	0,625
Эффективное значение нагрузки P_{Σ} , кВт		12,77	12,93	3,91	4,95	4,93	11,5	13,86	16,62	19
Генеральное среднее значение нагрузки $\bar{P}_{\Sigma}$, кВт			7,41			5,3			15,74	
Эффективное значение нагрузки по графику P_{Σ} , кВт			9,24			6,81			16,15	
Эффективное значение активной нагрузки, определенной по (7) P_{Σ} , кВт			9,28			6,5			16,26	
Расчетная нагрузка графиков нагрузок P_{Σ} , кВт		17,6	18,1	6,3	6,8	7,15	18,7	14,8	19,5	20

Для исчерпывающего анализа режимов суточных графиков фазных электрических нагрузок рассчитаны величины $W(P_T)$ для каждой фазы (рис. 3–5). Это позволяет определить вероятность совпадения в течение суток по величине средних значений P_{AC}, P_{BC}, P_{CC} .

Как видно из приведенных на рис. 3–5 графиков, распределение величин плотности вероятностей фазных нагрузок значительно отличается по величине, что приводит к несимметричному режиму работы ЭС.

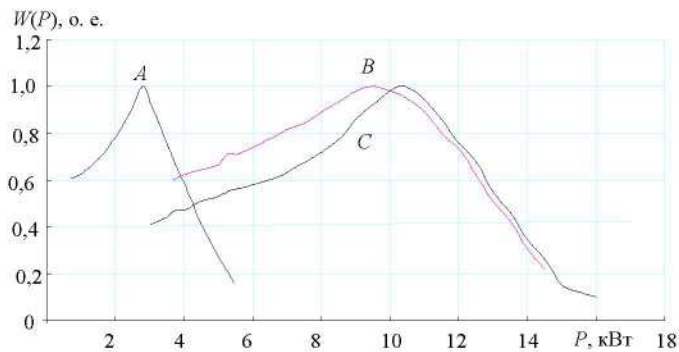


Рис. 3. Вероятность изменения фазных нагрузок по отношению к среднему значению для магистральных линий 1

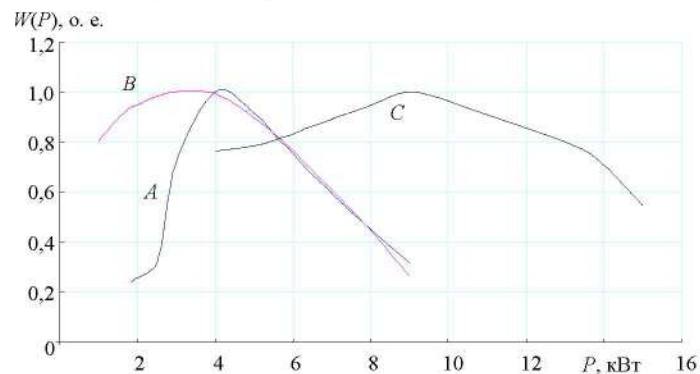


Рис. 4. Вероятность изменения фазных нагрузок по отношению к среднему значению для магистральных линий 2

Из графиков также видно, что равные нагрузки фаз *A* и *B* наблюдаются при $P(t) = 9\text{--}12$ кВт, плотность составляет всего $W(P) = 0,035\text{--}0,045$, т. е. примерно 1,1 ч они работают в симметричном режиме.

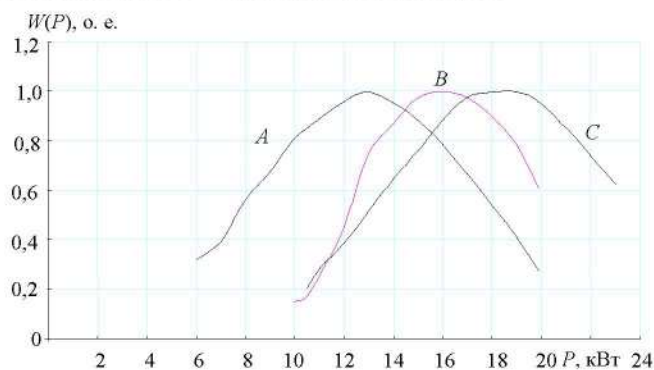


Рис. 5. Вероятность изменения фазных нагрузок по отношению к среднему значению для магистральных линий 3

Проведем симметрирование по графикам фазных электрических нагрузок, т. е. математическое осреднение для магистральных линий 1, 2, 3. Определим величины σ и $P_{\text{ср}}$ для полученного предполагаемого симметричного режима и $W(P)$ по формуле (6) для каждой магистральной линии. По результатам расчетов построены графики (рис. 6).

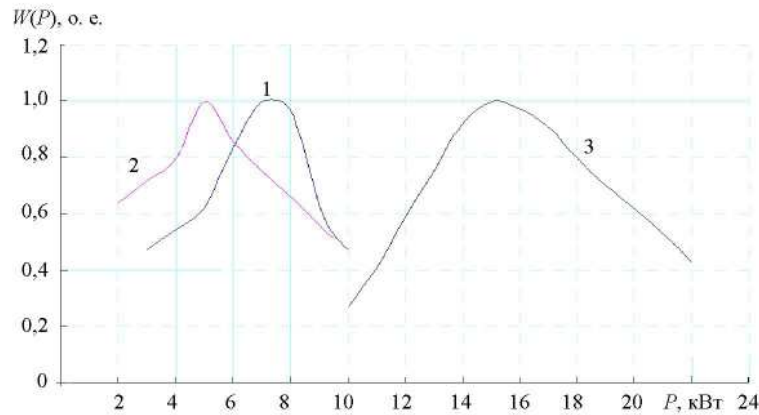


Рис. 6. Вероятность распределения нагрузки после симметрирования по фазам

Из графика видно, что для линии 1 $W_1(P_T) = 0,787$ о. е., для линии 2 $W_2(P_T) = 0,661$ и для линии 3 $W_3(P_T) = 0,698$ о. е. по отношению к $P_{\text{ср}}$ и электрические нагрузки по фазам, независимо друг от друга, могут изменяться соответственно для магистральных линий: 2,7–11; 1,5–9,5 и 9,0–25 кВт.

Для выяснения степени влияния среднеквадратичных отклонений фазных нагрузок на режим трехфазной четырехпроводной ЭС определим величины плотности вероятностей фазных нагрузок (рис. 1) по отношению к $\bar{P}_{\text{ср}}$, которая рассчитана по (2), а величины $\sigma_{\text{ф}}$ – фактическое значение, найденное по (5) для каждой фазы. По результатам полученных данных построен график на рис. 7, определена плотность вероятности по отношению $\bar{P}_{\text{ср}}$ для магистральной линии 1.

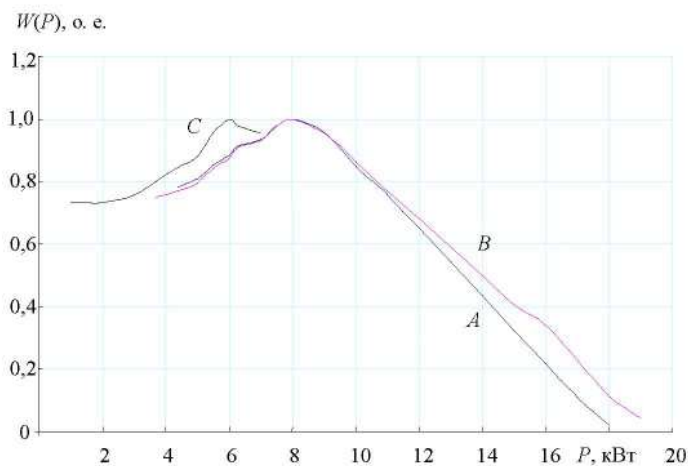


Рис. 7. Вероятность распределения активной нагрузки по отношению к генеральной средней нагрузке, но при разных $\sigma_{\text{ср}}$

Из графика видно, что одинаковые величины $\bar{P}_{\text{ср}}$, но разные значения $\sigma_{\text{ф}}$ приводят к несимметричному режиму трехфазных четырехпроводных ЭС. В течение суток нагрузки фаз A и B совпадают (равны) при $P_{\text{т}} = 8-10$ кВт, плотность распределения составляет всего $W(P) = 0,025-0,045$ о. е., т. е. в сутки симметрично работают две фазы (A, B) в течение 1,08 ч.

Как показывают расчеты и анализ их результатов, из-за неодинаковой $\sigma_{\text{ф}}$ трехфазная четырехпроводная ЭС не может работать в симметричном режиме. Поэтому предлагаем ввести показатель, который оценивал бы симметричность фазных нагрузок с учетом среднеквадратичных отклонений. Таким показателем может служить коэффициент асимметрии распределения $K_{\text{н}}$ [5]. Коэффициент асимметрии – безразмерная величина, и если распределение симметрично относительно $\bar{P}_{\text{ср}}$, то коэффициент асимметрии $K_{\text{н}} = 0$, и эту величину можно определить согласно [5] по формуле

$$K_{\text{н}} = \frac{M[P(t) - \bar{P}_{\text{ср}}]^3}{\sigma^3}. \quad (7)$$

Анализ графиков нагрузок трех магистральных линий показывает, что для обеспечения симметричного режима необходимы следующие условия:

1. $P_{\text{АС}} = P_{\text{ВС}} = P_{\text{АС}} = \bar{P}_{\text{ср}}$;
2. $K_{\text{нА}} = K_{\text{нВ}} = K_{\text{нС}} = 0$ или $K_{\text{нА}} = K_{\text{нВ}} = K_{\text{нС}}$.

Для трех магистральных линий величина $K_{\text{н}}$ рассчитана и приведена в табл. 2.

Для достижения удовлетворительного симметричного режима ЭС необходимо повысить равномерность графиков нагрузок. Для этого согласно [4] следует увеличить количество абонентов (электроприемников), и при росте эффективного количества электроприемников больше 200 имеем $P_{\text{р}} = P_{\text{ст}} = P_{\text{ср}}$.

Связь величины нагрузки и количества электроприемников выражается согласно [4] по формуле

$$P_{\text{р}} = P_{\text{ном}} K_{\text{н}} + \frac{\beta \sigma}{\sqrt{n_{\text{э}}}}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность электроприемников, кВт; $K_{\text{н}}$ – коэффициент использования; β – кратность меры уклонения (рассеяния), значение которой можно взять из [5]; $n_{\text{э}}$ – эффективное число электроприемников.

Так как $P_{\text{АС}} = P_{\text{ВС}} = P_{\text{АС}}$ определяем из графиков нагрузки, а $\bar{P}_{\text{ср}}$ – по формуле (2), следовательно, преобразуем формулу (8)

$$P_{\text{рф}} = P_{\text{фср}} + \frac{\beta \sigma}{\sqrt{n_{\text{э}}}}, \text{ кВт}. \quad (9)$$

Если взять по одному значению из возможных повторяющихся величин мощностью $P_{\text{т}}$, суммировать их плотность вероятности, то этой плотности вероятности соответствует такая β , по которой, используя формулу (9),

можно определить эффективное значение активной нагрузки P_{Σ} данного графика.

Максимальная погрешность величины P_{Σ} для трех магистральных линий, определенная по изложенному выше методу по отношению P_{Σ} , определенной по (4), составляет ~1 %, а остальные значения приведены в табл. 2.

Полученное выражение позволяет для симметрирования использовать величину эффективной нагрузки, поскольку устанавливается связь между P_{Σ} и n_{Σ} , а характер изменения графиков нагрузки можем определять величинами $P_{\text{ср}}$, σ , P_{Σ} .

Если определить величину P_{Σ} по формуле (4), то по формуле (9) можно рассчитать число абонентов для получения равномерного графика нагрузки с требуемой вероятностью $W(P_t)$, в зависимости от величины β , решив уравнение (9) по отношению n_{Σ} :

$$\sqrt{n_{\Sigma}} = \frac{\beta \sigma}{P_{\Sigma} - P_{\text{ср}}}. \quad (10)$$

Проведем проверку допустимости применения (10) для определения количества абонентов, поскольку в [4] формула (8) выведена для промышленных предприятий. Подставляя в (10) соответствующие величины $P_{\text{ср}}$, P_{Σ} , σ , β , полученные из графиков нагрузки (табл. 2), имеем: магистральная линия 1 – 63 абонента, 2 – 42 абонента, 3 – 52 абонента. Полученные результаты практически совпадают с фактическими числами абонентов, подключенных к магистральным линиям, приведенным в табл. 2. При снятии графиков нагрузки их было соответственно: линия 1 – 64 абонента, линия 2 – 42 абонента, линия 3 – 52 абонента.

Для увеличения вероятности симметричного режима работы трехфазных четырехпроводных ЭС 0,4/0,23 кВ повысим $W(P_t) = 0,787$ о. е. от фактического значения до $W(P_t) = 0,988$ о. е. Этой плотности вероятности соответствует $\beta = 2,5$. При расчете по (10) примем соотношение $\sigma/P_{\Sigma} - P_{\text{ср}} = \text{const}$, поскольку рост β приводит к увеличению n_{Σ} , а следовательно, и к уменьшению σ и $P_{\Sigma} - P_{\text{ср}}$.

Полученный результат можем трактовать следующим образом: при определенных значениях $P_{\text{ср}}$, P_{Σ} , σ по фазам обеспечивается симметричный режим трехфазной четырехпроводной ЭС с вероятностью $W(P_t) = 0,988$ о. е., которому соответствует $\beta = 2,5$, а количество абонентов определим из графика, приведенного на рис. 8.

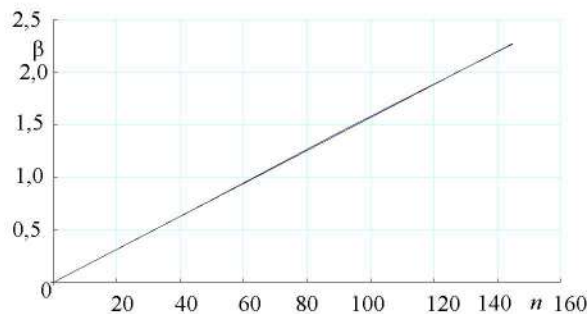


Рис. 8. Зависимость количества абонентов $n_{\text{аб}}$ от меры уклонения

ВЫВОДЫ

1. Применение статистического метода расчета электрических нагрузок позволяет более подробно и достоверно анализировать причины несимметричного режима четырехпроводных ЭС 0,4/0,23 кВ.
2. Анализ показал, что при симметрировании режима трехфазных четырехпроводных ЭС необходимо учитывать кратковременные отклонения электрических нагрузок от его среднего значения.
3. Предложен способ симметрирования ЭС 0,4/0,23 кВ по величине эффективных величин фазных нагрузок для оценки влияния среднего значения кратковременных отклонений нагрузки на режим работы трехфазных четырехпроводных ЭС.
4. Предложены метод и формула для повышения равномерности фазных графиков равномерности нагрузок, обеспечивающие более эффективный режим работы трехфазных четырехпроводных ЭС в бытовом секторе.
5. Предложенный метод симметрирования нагрузок можно применять и для сетей другого назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг, Ю. Б. О предложениях к программе энергосбережения в осветительных установках г. Москвы / Ю. Б. Айзенберг // Светотехника. – 1996. – № 5/6. – С. 20–22.
2. Головкин, П. И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
3. Козлов, В. А. Электроснабжение городов / В. А. Козлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 264 с.
4. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С. Д. Волобровский [и др.]. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
5. Румшинский, Л. З. Элементы теории вероятностей / Л. З. Румшинский. – М., 1970. – 256 с.

Поступила 30.10.2009