

УДК 621.311

**ОБ ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ
ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК****БАЛАМЕТОВ А.Б., АЛИЕВ Х.Т., ХАЛИЛОВ Э.Д., МАМЕДОВ С.Г.***Азербайджанский Научно-Исследовательский и Проектно-Изыскательский
институт Энергетики, АО «Азерэнерджи»*

При расчете потерь энергии в распределительных электрических сетях используются характеристики графика нагрузки. Для определения дисперсии необходимо иметь статистический ряд распределения случайной величины. Однако, получение в условиях эксплуатации статистических рядов распределения нагрузок весьма затруднительно. С целью преодоления этих недостатков получили развитие методы расчета потерь энергии, основанные на вероятностном представлении графиков электрических нагрузок. В данной работе рассматривается метод расчета потерь, который основан на представлении нагрузки по продолжительности как непрерывной случайной величины.

Закономерные изменения нагрузки проявляются, с одной стороны, при суточном изменении нагрузок, с другой – при сезонном изменении. Поэтому суточные графики целесообразно рассматривать в качестве реализации случайного процесса, при этом отдельная реализация $x(t)$, полученная в результате регистрации графика нагрузки, может рассматриваться как элемент множества возможных реализаций случайного процесса $x(t) \in M$. Для охвата влияния суточного и сезонного факторов на нагрузку следует исследование графика нагрузки как случайного процесса. На подстанциях без обслуживающего персонала, как правило, регистрируются в течение года только две реализации – зимние и летние суточные графики, характеризующие максимальную и минимальную нагрузки. Следовательно, множество графиков нагрузок, число его известных элементов недостаточно для расчета статистических характеристик графика нагрузки. В этом случае неизвестные элементы множества с достаточной для практических расчетов точностью могут быть рассчитаны исходя из особенностей изучаемого случайного процесса.

Графики нагрузки распределительных сетей 6 - 10 кВ и выше энергосистем являются графиками смешанной нагрузки и имеют самые различные конфигурации. Графики нагрузки в распределительных сетях формируются под влиянием множества факторов, и обычно по продолжительности имеют вид плавно убывающих функций, которые аппроксимируются различными аналитическими зависимостями [2,4-7].

Графики нагрузки по продолжительности как случайная величина, подчиняющейся закону Бета - распределения. Для расчета потерь энергии необходима оценка характеристики графика нагрузки как случайной величины. Для этой цели используется график нагрузки по продолжительности. Характеристикой графика нагрузки по продолжительности является продолжительность наибольшей нагрузки T_{\max} . В зависимости от значения T_{\max} характер графика нагрузки по продолжительности может принимать разнообразную форму. Принимая допущение о том, что изменение нагрузки происходит непрерывно, график нагрузки по продолжительности можно описать непрерывной случайной функцией. В зависимости от значения T_{\max} характер функции меняется между крайними значениями: от $g_1 = I_{\max}(t)$ до $g_n = I_{\min}(t)$.

Графики нагрузки по продолжительности для различных значений T_{\max} можно представить как непрерывную случайную величину, подчиняющуюся закону β - распределения с плотностью вероятности [2,3]:

$$f(x, \gamma, \eta) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\gamma + \eta)}{\Gamma(\gamma)\Gamma(\eta)} x^{\gamma-1} (1-x)^{\eta-1}, & 0 \leq x \leq 1, 0 \leq \gamma, 0 \leq \eta \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (1);$$

Здесь Γ – гамма-функция.

В β - распределении γ и η являются параметрами формы функций распределения. Соответствие распределения вероятностей нагрузки по закону β - распределения устанавливается путем расчета функции распределения в характерных точках параметров формы [3].

Определяется обратная функция $t(P)$ аналитической функции $P(t)$. Указанная функция может быть получена путем преобразований $t(P)$.

Вводится вспомогательная функция

$$F_1(P) = \frac{t(P)}{t_k} = p(P > P_T) \quad (11),$$

выражающая вероятность события $(P > P_T)$, где P_T - текущее значение случайной величины P .

Искомая функция распределения $F(P)$, выражающая вероятность обратного события: $F(P) = p(P < P_T)$ определяется как

$$F(P) = 1 - F_1(P) = 1 - \frac{t(P)}{t_k}$$

Выражение для плотности распределения вероятностей P :

$$f(P) = \frac{df(P)}{dP}$$

и соответствующее ему выражение математического ожидания:

$$M_a = P_{\min} + \frac{1}{t_k} \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} f(P) dP$$

Потери энергии с учетом β - распределения нагрузки в [2,4,6] предлагается определить в соответствии с интегральной функцией. Интегральная функция Бета – распределения при изменении параметров функции распределения в диапазоне от $\gamma=1, \eta=0$ до $\gamma=\eta=1$ или от $\gamma=\eta=1$ до $\gamma=0, \eta=1$ имеет вид:

$$F(x, \gamma, \eta) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ \frac{\int_0^x t^{\gamma-1} (1-t)^{\eta-1} dt}{\int_0^1 t^{\gamma-1} (1-t)^{\eta-1} dt}, & 0 \leq x \leq 1, \\ 1, & x > 1, \end{cases}$$

В свою очередь, параметры формы графика γ и η зависят от среднего значения \bar{x} и дисперсии $D[x]$ нагрузки как случайной величины.

Так как расчет $D[x]$ для электрической нагрузки представляет значительные трудности, то предлагается производить расчет приближенно по значению средней нагрузки.

Среднее значение тока нагрузки берется в относительных единицах и вычисляется в соответствии со следующей формулой:

$$x = \frac{\bar{I} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}.$$

В [4,6] приводятся формулы, полученные выбором параметров β -распределения через функции распределения вероятностей в пределах от $\gamma=0; \eta<1$ до $\gamma<1; \eta=1$ и от $\gamma=1; \eta<1$ до $\gamma<1; \eta=1$.

В работах АзНИИЭ и ЭП [7-9] приводятся результаты анализа погрешностей разных формул для тестовых графиков нагрузки. Установлено, что представление нагрузки как непрерывной случайной величины, подчиняющейся закону β -распределения для плотности вероятностей, имеет систематические погрешности [4,6]. Предложены эмпирические зависимости для коэффициента формы графика нагрузки с вводом третьего параметра, продолжительности минимальной нагрузки и имеющие лучшие характеристики аппроксимации.

Вопросы выбора вида распределения для плотности вероятностей нагрузки, имеющие лучшие характеристики аппроксимации в известных работах [2,4,6,7-9], недостаточно полно рассмотрены. Поэтому задача построения модели графика нагрузки, как непрерывной случайной величины, выбора вида распределения для плотности вероятностей, не является решенной, и ее решение требует дальнейших исследований.

Аппроксимирующие зависимости графиков нагрузки. Годовой график нагрузки по продолжительности может быть выражен разного вида функциями: параболической; линейной; экспоненциальной; гиперболической.

В [6] график нагрузки по продолжительности представляется в виде плавно убывающей функции. Аппроксимация графиков нагрузки по продолжительностям проводится следующими аналитическими зависимостями тока во времени (рис.1):

$$I = I_{\max} - (I_{\max} - I_{\min}) \left(\frac{t}{T} \right)^{\lambda} \quad (1)$$

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \left(1 - \frac{t}{T} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

где I_{\max}, I_{\min} значения максимальных и минимальных токов за расчетный период времени T .

Вспомогательный коэффициент λ определяется по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{I_{\text{cp}} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\text{cp}}}$$

Аппроксимация графиков нагрузки аналитическими зависимостями вида (1) и (2) (рис. 1.) приводит к отличию их от реальных графиков нагрузки. Моделирование параметров зависимостей вида (1) и (2) имеет значительные систематические погрешности. Зависимость вида (1) имеет расхождение от реальных в области минимальных нагрузок; зависимость вида (2) имеет расхождение в области максимальных нагрузок (рис.1). Расхождение формы зависимостей вида (1) и (2) от реальных ставит задачу исследования по выбору соответствующих аппроксимирующих зависимостей.

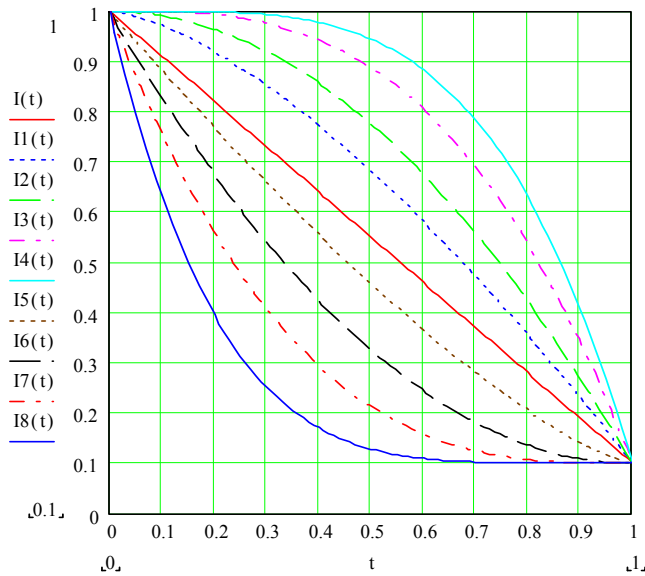


Рис 1. Аппроксимирующие зависимости графиков нагрузки вида (1): I(t) при $\lambda=1$, I1(t) при $\lambda=1.5$, и I2(t) при $\lambda=2$, I3(t) при $\lambda=3$, I4(t) при $\lambda=4$ и вида (2): I5(t) при $\lambda=0.75$, I6(t) при $\lambda=0.5$, I7(t) при $\lambda=0.333$, I8(t) при $\lambda=0.2$.

Характеристики типовых графиков нагрузки. Для анализа параметров реальных графиков нагрузки были определены параметры k_3 , P_{min} , t_{min} некоторых типовых графиков нагрузки в соответствии со справочными данными [1] таблица 1.

Таблица 1. Параметры k_3 , P_{min} , t_{min} некоторых типовых графиков нагрузки [1].

Графики нагрузки	k_3	P_{min} , в о.е.	t_{min} в о.е.	t_{max} в о.е.
Жилого здания с газовыми плитами	0.379	0.15	0.17	2
Жилого здания с бытовыми электрическими плитами	0.479	0.15	0.25	0.17
Поликлиники	0.566	0.2	0.25	0.085
Распределительной линии 6-10 кВ	0.683	0.3	0.17	0.17
Распределительного пункта 10 кВ городской ЭС	0.675	0.3	0.25	0.25
ТП 10 кВ, многоквартирных жилых зданий с электрическими плитами	0.479	0.15	0.17	0.085

Аппроксимирующие зависимости графиков нагрузки экспоненциальной функцией. Для обоснования вида аппроксимирующей функции графиков нагрузки рассмотрим характеристики показательными функциями.

Аппроксимация графиков нагрузки (показательными) экспоненциальными зависимостями вида

$$I = I_{min} + (I_{max} - I_{min}) \cdot e^{-\alpha_1 t^p} \quad (3)$$

Аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида полунормального распределения

$$I = I_{min} + (I_{max} - I_{min}) \cdot e^{-(\alpha_2 t)^2} \quad (4)$$

Здесь α_1 , α_2 и p - параметры масштаба, определяемые в результате аппроксимации.

Для полунормального распределения обычно в (4) $p=2$.

Сопоставление аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки. Для сопоставления характеристик аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки вида (1), (2) и (3) на рис. 2. приводятся результаты аппроксимации для графиков нагрузки с $k_3=0.4$, $I_{min}=0.1$, $I_{max}=1$, $T=1$ и $\lambda=0.5$ степенной функцией вида (1), (2) и экспонентой вида (3) для разных p и α обеспечивающих $k_3=0.4$.

Для обеспечения $k_3=0.4$ коэффициенты аппроксимации p и α экспонентой вида (3) подбираются из условия

$$k_3 = \int_0^1 i(t) dt = \int_0^1 \left(I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot e^{-\alpha t^\rho} \right) dt \quad (5)$$

Для графика нагрузки вида (3) получено

$$i(t) = 0.1 + 0.9 \cdot e^{-10.2t^{2.2}} \quad (6)$$

Для графика нагрузки вида (1) имеем

$$i(t) = 0.1 + (1 - 0.1) \cdot \left(1 - \frac{t}{T} \right)^{0.5} = 0.1 + 0.9 \cdot \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 \quad (7)$$

Моделировались характеристики типовых графиков нагрузки зависимостями вида (3) подбором масштабных коэффициентов методом наименьших квадратов. В связи с трудностями аппроксимации функцией вида (3) подбор коэффициентов аппроксимации осуществлен проведением многовариантных расчетов при задании ρ выбором оптимального α для каждого варианта. Например, результаты аппроксимации для двух реальных графиков нагрузки с $k_3 = 0.5$ и 0.4 экспонентой вида (3) для разных ρ и α с соответствующими среднеквадратическими ошибками удовлетворяют для графика нагрузки с $k_3 = 0.5$ $\rho = 3.2$ и $\alpha = 11.52$ и для графика нагрузки с $k_3 = 0.4$ $\rho = 2.2$ и $\alpha = 10.2$.

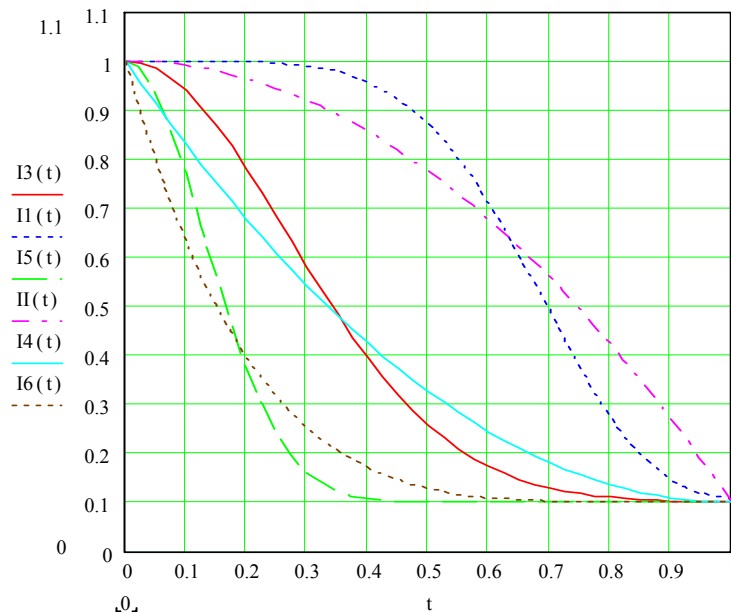


Рис. 2. Семейство аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки вида (1) $I(t)$ при показателе степени $\lambda=2$, и вида (2) $I4(t)$ при $\lambda=0.5$, и $I6(t)$ при $\lambda=0.2$ и аппроксимирующей зависимости вида (3) при параметрах $I1(t)$ при $\alpha = 5$, и $\rho = 5$, $I3(t)$ при $\alpha = 7$, и $\rho = 2$, и $I5(t)$ при $\alpha = 30$, и $\rho = 2$.

Для сопоставления характеристик аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки на рис. 3. приводятся результаты моделирования семейства графиков нагрузки с $k_3 = 0.4$, $I_{\min} = 0.1$, $I_{\max} = 1$, $T = 1$ и $\lambda = 0.5$ степенной функцией вида (1), (2) и экспонентой вида (3) для разных ρ и α обеспечивающих $k_3 = 0.4$.

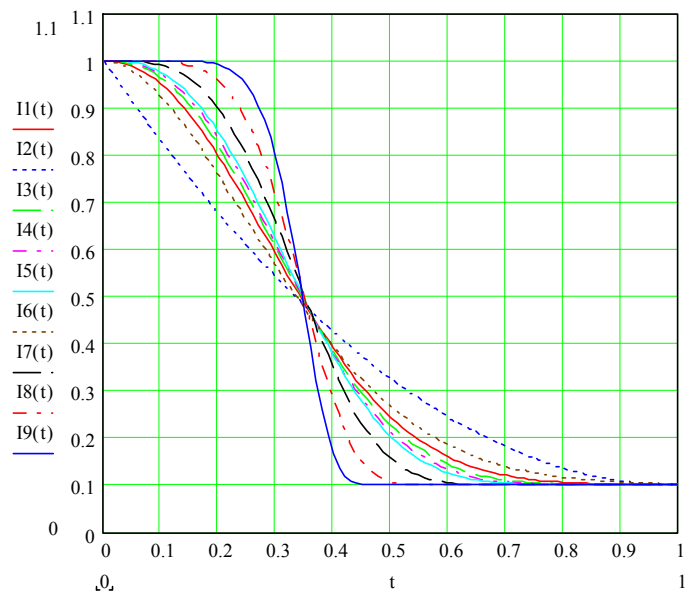


Рис. 3. Семейство графиков нагрузки с $k_3=0.4$, $I_{\min}=0.1$, $I_{\max}=1$, $T=1$ и $\lambda=0.5$ степенной функцией вида (2) и экспонентой вида (3) для разных ρ и α обеспечивающий $k_3=0.4$.

Таким образом, аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида (3) позволяет получить возможные пределы распределения k_ϕ близкие к реальным.

Результаты предварительной оценки потерь энергии с использованием аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки по продолжительности вида (3) и (4) показывают, что при этом точность моделирования значительно растет.

Таким образом, предложенная постановка для оценки переменных (нагрузочных) потерь отличается от известных тем, что она основана на использовании наиболее близких аппроксимирующих зависимостей графика нагрузки и требует наименьших затрат, обеспечивая при этом необходимую точность моделирования.

Задание типа графика уже предполагает наличие данных о его конфигурации, а в этом случае целесообразно пользоваться непосредственно формулой (1). При отсутствии таких данных задание типа графика может быть осуществлено только субъективно. В практических расчетах целесообразно использовать аппроксимирующие зависимости для графика нагрузки близкие реальным характеристикам.

Пример. Через элемент распределительной сети, обладающий активным сопротивлением 5 Ом, в течение расчетного времени 720 ч было передано $W_a = 287000$ кВт-ч и $W_p = 144050$ кВАр-ч электроэнергии. Требуется определить значение потерь энергии, возникающих в элементе сети, и оценить возможные интервалы изменения потерь энергии вызванные не полностью информацией о графике нагрузки, если известно, что в результате измерений были получены значения $I_{\max} = 62.5$ А, $I_{\min} = 6.25$ А. Результаты расчетов сравнить с теми результатами, которые получаются при использовании метода времени потерь, по формулам полученным выбором параметров β -распределения через функции распределения вероятностей. Среднее эксплуатационное напряжение $U_c = 10,3$ кВ.

Расчет потерь энергии по методике полученной выбором параметров экспоненциального (полунормального) распределения.

Для численной оценки потерь энергии, были произведены аппроксимация характеристик типовых графиков нагрузки функциями вида (3)

Для сопоставления характеристик аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки с $k_3 = 0.4$, $I_{\min} = 0.1$, $I_{\max} = 1$, $T = 1$ и $\lambda = 0.5$ степенной функцией вида (1), (2) и

экспонентой вида (3) для разных ρ и α , обеспечивающих $k_3 = 0.4$. Масштабные параметры ρ и α для семейства графиков нагрузки с $k_3 = 0.4$ экспонентой вида (3) приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты аппроксимации графиков нагрузки аналитическими зависимостями вида (3).

Номер графика	k_3	λ	I_{\min}	Масштабные параметры зависимости (3)		Характеристики графика (3)		
				α	ρ	$i^2(t)$	D	k_ϕ^2
1	0.4	0.5	0.1	6.000	1.83	0.255	0.095	1.595
2				7.065	2.00	0.261	0.101	1.631
3				8.152	2.15	0.266	0.106	1.662
4				10.202	2.37	0.272	0.112	1.698
5				12.202	2.55	0.275	0.115	1.721
6				14.000	2.69	0.279	0.119	1.742
7				30.000	3.43	0.291	0.131	1.817
8				158.000	5.00	0.305	0.145	1.908
9				4000.000	8.00	0.318	0.158	1.988

Характеристики графика (3) определены с использованием выражений:

- математическое ожидание непрерывной случайной величины

$$M(X) = \int_a^b x \cdot f(x) dx,$$

- дисперсия непрерывной случайной величины

$$D(X) = \int_a^b x^2 f(x) dx - [M(X)]^2.$$

Интервалы изменения потерь энергии определяются по формуле

$$\Delta W = \frac{k_\phi^2 \cdot r \cdot (W_A^2 + W_P^2) \cdot 10^{-3}}{U_c^2 \cdot T} = \frac{1.595 \cdot 5 \cdot (287000^2 + 14450^2) \cdot 10^{-3}}{10.3^2 \cdot 720} = 10766 \text{ кВт. час}$$

используя данные таблицы 2. При этом интервалы изменения потерь энергии лежат в пределах $10766 \div 13419$ кВт. час.

В зависимости от коэффициентов аппроксимации α и ρ графиков нагрузки, для данной задачи значения k_ϕ^2 меняются в пределах $1.6 \div 2$. Таким образом, аппроксимация графиков нагрузки зависимостями вида (3) позволяет оценить возможные пределы изменения k_ϕ и потерь энергии.

1. Расчет потерь энергии по формулам, полученным выбором параметров β -распределения через функции распределения вероятностей [2,4,6].

Вычисляем величину модуля среднего тока:

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{W_A^2 + W_P^2}}{\sqrt{3} \cdot U_c \cdot T} = 25 \text{ А}$$

Определяем диапазон, в котором находятся параметры λ и η . Для этого вычислим следующее отношение:

$$\frac{|I_{cp}| - |I_{\min}|}{|I_{\max}| - |I_{cp}|} = 0.4$$

Принимая $\lambda=1$, $\eta=0.4$ определяем дисперсию

$$D_1 = \frac{(|I_{\max}| - |I_{cp}|)^2 (|I_{cp}| - |I_{\min}|)}{2 \cdot |I_{\max}| - |I_{cp}| - |I_{\min}|} = 281.25 \text{ A.}$$

Значение потерь энергии

$$\Delta W = \left[\frac{r}{U_c^2 \cdot T} \cdot (W_A^2 + W_P^2) + 3 \cdot r \cdot T \cdot D_1 \right] 10^{-3} = 9787.5 \text{ кВт.часс.}$$

2. Погрешность в определении потерь энергии оценивается, принимая близости аппроксимированных зависимостей вида (3) для графиков нагрузки к реальным. В [7-9] доказано наличие систематической погрешности формул расчета потерь энергии по известным выражениям [2-6].

Абсолютное значение ошибки расчета потерь энергии по известным выражениям [2-6] лежит в пределах $(10766 \div 13419) - 9787.5 = -978.75 \div -3631.5$ кВт.час.

Относительное значение ошибки составляет $100(10766 \div 13419) / 9787.5 = 10 \div 37.1$ %.

ВЫВОДЫ

1. Представление графиков нагрузки по продолжительности для различных значений T_{\max} непрерывной случайной величиной, подчиняющейся закону β - распределения имеет при изменении параметров функции распределения в диапазоне от $\gamma=1, \eta=0$ до $\gamma=\eta=1$ или от $\gamma=\eta=1$ до $\gamma=0, \eta=1$ значительные систематические погрешности.

2. Результаты предварительной оценки потерь энергии использованием аппроксимирующих зависимостей графиков нагрузки по продолжительности, подчиняющейся закону экспоненциального и полунормального распределения показывают, что при этом точность моделирования значительно растёт.

3. Предложена методика оценки переменных потерь в распределительных сетях, основанная на использовании числовых вероятностных характеристик нагрузок, подчиняющихся закону экспоненциального и полунормального распределения.

1. Электротехнический справочник: В 3 т. Т3. 2 кн. Кн 1. Производство и распределение электрической энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.

2. Клебанов Л.Д. Вопросы методики определения и снижения потерь электрической энергии в сетях. Л: Изд-во ЛГУ, 1973, - 72 с.

3. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М., «Мир», 1969, 395 с.

4. Л.П. Анисимов, Л.С. Левин, В.Г. Пекелис. Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях. Электричество 1975, №4, с.27-30.

5. Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч. Потери мощности и энергии в электрических сетях. Под ред. Г.Е. Поспелова. М.: Энергоиздат, 1981. - 216 с.

6. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. В.Э.Воротницкий, Ю.С.Железко, В.Н.Казанцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1983.-368 с.

7. Баламетов А.Б., Мамедов С.Г. Погрешности определения коэффициента формы при расчете потерь энергии в электрических сетях энергосистем. Проблемы энергетики 2000, №3, с. 33-40.

8. Баламетов А.Б., Мамедов С.Г. Зависимости определения коэффициента формы графика при расчетах потерь электроэнергии. Проблемы энергетики 2001, №2, с. 3-10.

9. Баламетов А.Б., Мамедов С.Г. Об определении коэффициента формы при расчетах потерь электроэнергии с учетом ограничений в электроснабжении. Энергетика ... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). -2002.- №2, с. 21-29.

ELEKTRİK YÜKLƏRİ GRAFİLƏRİ EHTİMALLA VERİLDİKDƏ ENERJİ İTKİLƏRİNİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ HAQQINDA

BALAMETOV Ə.B., ƏLİEV X.T., XƏLİLOV E.D., MƏMMƏDOV S.Q.

Paylayıcı elektrik şəbəkələrində enerji itkilərini hesabladıqda yük qrafiklərinin xarakteristikalarından istifadə olunur. Dispersiyanın qiymətləndirilməsi üçün təsadüfi kəmiyyətin paylanması statistik sırası məlum olmalıdır. Lakin istismar şəraitində statistik paylanma sıralarının alınması kifayət qədər çətinlikdir. Bu çətinliklərin aradan qaldırılması məqsədi ilə yük qrafiklərinin ehtimalla verildiyi hala əsaslanan enerji itkilərinin hesabat metodları inkişafını tapmışdır. Bu məqalədə enerji itkilərinin hesabatı üçün yükün kəsilməz təsadüfi kəmiyyət kimi təsvirinə əsaslanan metoda baxılır.

ABOUT A ENERGY LOSS EVALUATION AT PROBABLE REPRESENTATION OF ELECTRIC LOADINGS DIAGRAMS

BALAMETOV A.B., ALIYEV H.T., KHALILOV E.D., MAMEDOV S.Q.

At account of energy losses in distributive electrical networks characteristics of a production schedule are used. For definition of dispersion it is necessary to have a statistical line of distribution of a random variable. However, reception under operating conditions statistical lines of distribution of loadings rather inconveniently. With the purpose of overcoming these lacks have received development methods of account of losses of the energy, based on probable representation of diagrams of electric loadings. In the given work the method of account of losses, which is based on representation of loading on duration as a continuous random variable, is considered.