

НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУММАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОМЕХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ ШАХТЫ

Н. П. Демченко

Донецк

Под суммарными электрическими помехами, действующими и высоковольтной сети шахты, подразумеваются электромагнитные возмущения, которые возникают в месте установки приемных узлов системы телемеханики при работе различных электроустройств шахты. Помехи,

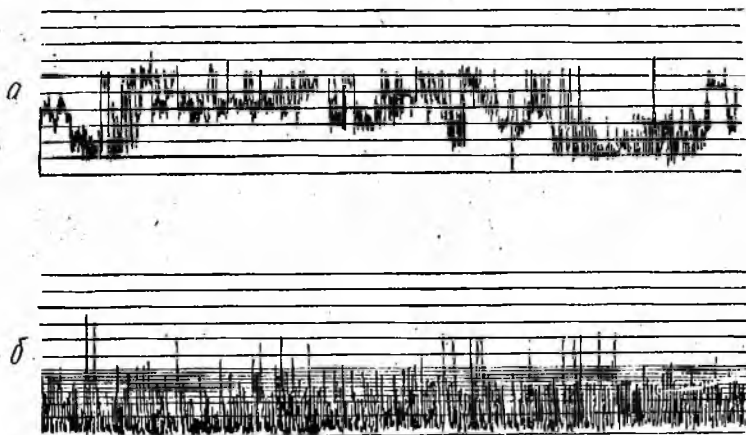


Рис. 1. Отрезки осциллограмм помех: *a* — на частоте $f = 15$ кГц; *б* — на частоте $f = 70$ кГц.

создаваемые различными источниками, рассматриваются в совокупности.

В общем случае суммарные электрические помехи, действующие в высоковольтной сети, представляют собой случайный процесс. Объем и характер экспериментальных исследований, связанных с определением статистических характеристик случайного процесса, существенно зависят от вида этого процесса.

Описание метода измерений

Для измерения характеристик суммарных электрических помех и выявления их характера в течение длительного времени использовался типовой избирательный указатель уровня ИУУ-300. В качестве устройства, регистрирующего мгновенные значения электрических помех, применялся самописец уровня электрических колебаний типа Н-110. Запись производится на диаграммную бумагу в логарифмическом масштабе с динамическим диапазоном 50 дБ (рис. 1).

Установим связь между помехами, записанными с выхода ИУУ-300 самописцем, и исходным случайным процессом, воздействующим на вход измерительного прибора.

Избирательный указатель уровня ИУУ-300 представляет собой селективную узкополосную систему с полосой пропускания $\Delta f = 1$ кГц, состоящую из ряда линейных и нелинейных элементов.

Для такой системы выполняется неравенство

$$\Delta f \ll f_0.$$

Таким образом, на выходе измерительного прибора протекает узкополосный случайный процесс, статистические характеристики которого значительно отличаются от характеристик исходного процесса. Коэффициент корреляции для такого процесса имеет вид

$$R(\tau) = \rho(\tau) \cos \omega_0 \tau, \quad (1)$$

где $\rho(\tau)$ — медленно изменяющаяся функция, определяющая огибающую случайного процесса.

Огибающая исходного случайного процесса проходит через измерительную систему как через линейную, поскольку нелинейные искажения в приборе незначительны. Самописец уровня электрических колебаний представляет собой широкополосный линейный усилитель, детектор и магнитоэлектрическую систему с постоянной времени $\tau = 0,2$ сек.

Магнитоэлектрическую систему можно представить как линейную (инерционную) с постоянными параметрами. Процесс $U'(t)$ на выходе такой линейной системы можно выразить через процесс на входе $U(t)$ при помощи интеграла [1].

$$U'(t) = \int_0^t U(t - \tau) h(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $U(t)$ — напряжение на входе линейной системы, равное произведению огибающей колебательного импульса и коэффициента передачи детектора;

$h(t)$ — импульсная переходная функция фильтра;

t — момент наблюдения процесса на выходе системы;

τ — момент приложения процесса ко входу.

Если процесс на входе линейной системы с постоянными параметрами стационарен по крайней мере в широком смысле, то на выходе такой системы получим также стационарный случайный процесс [1].

Таким образом, характер помех, записанных самописцем на диаграммную бумагу, не отличается от характера процесса на входе измерительной системы и говорить о последнем можно, определив характер процесса на выходе по записям помех.

Среднее значение помех на выходе линейной инерционной системы

$$\overline{U'(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt = \overline{U(t)} (1 - e^{-\alpha T}), \quad (3)$$

где

$$\alpha = \frac{1}{\tau}.$$

При достаточно большом времени анализа

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \overline{U'(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \{ \overline{U'(t)} [1 - e^{-\alpha T}] \} = \overline{U(t)}. \quad (4)$$

Как видно из уравнения, среднее значение помех на выходе, если время анализа немного превышает постоянную времени линейной системы, незначительно отличается от среднего значения помех на входе.

Определить моменты распределения случайного процесса на выходе линейной (инерционной) системы в случае, если процесс на входе не является нормальным, очень сложно. Нормальный случайный процесс при прохождении через линейные (инерционные) системы остается нормальным.

Запись электрических помех производилась в течение нескольких месяцев по 1—2 суток на каждой частоте в диапазоне частот от 15 до 100 кГц. Результаты записи помех позволили определить вид и характер последних.

Для каждой реализации на одной частоте определено среднее значение помех и его изменение в течение суток. Построены функция распределения помех в диапазоне частот от 15 до 100 кГц и кривые, характеризующие суточные изменения параметров распределения амплитуд электрических помех, возникающих с вероятностями 0,5; 0,75; 0,9 и 0,95. Построена также спектральная характеристика максимального уровня помех, возникающих в сети при нестационарном режиме работы (пробой и утечки в кабелях, высоковольтная аппаратура).

Некоторые результаты исследований

На основании предварительного исследования свойств электрических помех в высоковольтной сети можно предположить, что электрические помехи имеют нестационарный характер. Чтобы доказать это, а также определить характер нестационарности, были проведены дополнительные исследования.

Для стационарных в широком смысле случайных процессов характерны независимость математического ожидания и дисперсии от времени и независимость корреляционной функции от временного сдвига моментов отсчета [2].

Вероятностные характеристики нестационарных процессов являются функциями времени. Следовательно, экспериментальное подтверждение гипотезы о нестационарности суммарных электрических помех в высоковольтной сети заключается в исследовании зависимости от времени математического ожидания $M_x(t)$, дисперсии $D_x(t)$ и корреляционной функции $R_x(\tau)$.

Требуется проверить гипотезы о том, что

$$\begin{aligned} \overline{U'(t_i)} &\neq \overline{U'(t_j)}, \\ \overline{[U'(t_i) - \overline{U'(t_i)}]^2} &\neq \overline{[U'(t_j) - \overline{U'(t_j)}]^2}, \\ \overline{U'(t_i)U'(t_i + \tau)} &\neq \overline{U'(t_j)U'(t_j + \tau)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Приведем вычисления математического ожидания, дисперсии и корреляционной функции на примере реализации $f = 15$ кГц.

Математическое ожидание определяется по формуле

$$M_x(t) = \overline{U'(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n U'(t)}{n}. \quad (6)$$

Вычисления сведены в таблицу.

Приведенные данные показывают, что математическое ожидание не является постоянным, а изменяется во времени в значительных пределах.

№ п/п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M_x(t) \text{ mv}$	5,6	2,36	4,0	3,2	2,4	3,7	1,0	0,43	1,0	3,7
№ п/п.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$M_x(t) \text{ mv}$	2,0	3,4	0,18	0,2	1,9	6,3	4,0	4,7	2,0	1,0

Произведем центрирование реализаций, вычитая из каждого мгновенного значения уровня помех математическое ожидание, и определим дисперсию

$$D_x(t) = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{U}'^2(t)}{n}, \quad (7)$$

где $\dot{U}'(t) = U'(t) - \overline{U'(t)}$ — центрированное значение.

Вычислим дисперсии для двух отрезков реализации:

$$\sigma_1^2 = 2,78, \quad \sigma_2^2 = 2,25.$$

Снятие вида функции корреляции (в интервале $0 \leq \tau \leq \tau_0$) для всех моментов отсчета нескольких реализаций довольно громоздко. Поэтому можно ограничиться вычислением одного—двух значений коэффициента корреляции, соответствующих таким фиксированным временным сдвигам τ_1, τ_2 , что $0,4 \leq \rho_x(\tau) \leq 0,6$. Значения нормированной корреляционной функции определяем, применяя операции математического ожидания для центрированных мгновенных значений, сдвинутых относительно друг друга на интервалы τ_1 и τ_2 :

$$\rho(\tau_1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \dot{U}'(t_i) \dot{U}'(t_i + 1)}{\sigma^2(n-1)}, \quad (8)$$

$$\rho(\tau_2) = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} \dot{U}'(t_i) \dot{U}'(t_i + 2)}{\sigma^2(n-2)}.$$

Вычислены два значения коэффициента корреляции для двух отрезков реализаций

$$\begin{aligned} \rho_1(\tau_1) &= 0,558, & \rho_2(\tau_1) &= 0,75, \\ \rho_1(\tau_2) &= 0,17, & \rho_2(\tau_2) &= 0,61. \end{aligned}$$

Приведенные значения коэффициентов корреляции показывают, что

$$\begin{aligned} \rho_1(\tau_1) &\neq \rho_2(\tau_1), \\ \rho_1(\tau_2) &\neq \rho_2(\tau_2). \end{aligned}$$

Следовательно, на основании проведенных исследований изменения во времени математического ожидания $M_x(t)$, дисперсии $D_x(t)$ и корреляционной функции $R(\tau)$ можно сделать вывод о том, что исследуе-

мый случайный процесс является нестационарным. Важной характеристикой его является скорость проявления нестационарности. В общем случае этот процесс можно представить как произведение неслучайной функции $\varphi(t)$ на эргодическую стационарную случайную функцию $Z(t)$ [3].

$$X(t) = \varphi(t) Z(t). \quad (9)$$

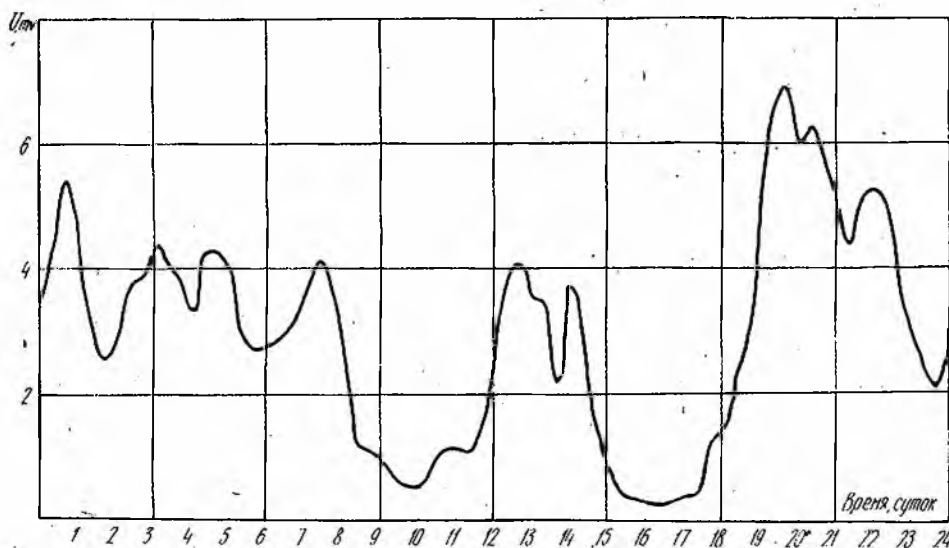


Рис. 2. Изменение среднего значения помех в течение суток ($f = 15$ кГц).

Математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция такой нестационарной случайной функции

$$\begin{aligned} M_x(t) &= \varphi(t) M_z, \\ D_x(t) &= \varphi^2(t) D_z, \\ R_x(t_i, t_j) &= \varphi(t_i) \varphi(t_j) R_z(\tau). \end{aligned} \quad (10)$$

Представление имеющегося случайного процесса в виде произведения указанных выше функций справедливо, поскольку математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция зависят от времени, что имеет место в реальных реализациях помех.

Для выявления характера нестационарности необходимо знать характер функции $\varphi(t)$ в уравнениях (10). Функция $\varphi(t)$ выражает закон изменения нестационарной части случайного процесса.

Разбив достаточно длинную реализацию помех стационарного случайного процесса на отдельные отрезки, вычислив математическое ожидание для каждого отрезка и построив зависимость математического ожидания от времени, получим вид искомой функции $\varphi(t)$. Интервал осреднения должен быть меньше периода нестационарности. В противном случае выявление нестационарности окажется невозможным.

На рис. 2 показан вид функции $\varphi(t)$. Как видно из графика, математическое ожидание такого случайного процесса не является постоянным, а изменяется во времени в значительных пределах.

Электрические помехи носят нестационарный характер с быстрой нестационарностью. Период нестационарности изменяется в значительных пределах — от нескольких минут до нескольких часов. Функция

$\varphi(t)$, определяющая нестационарность, сильно коррелирована со временем суток и рабочих смен шахты. Среднее значение электрических помех максимально в ночное время и в середине дня. Это объясняется тем, что на данной шахте в данное время суток наиболее интенсивно работает шахтное электрооборудование.

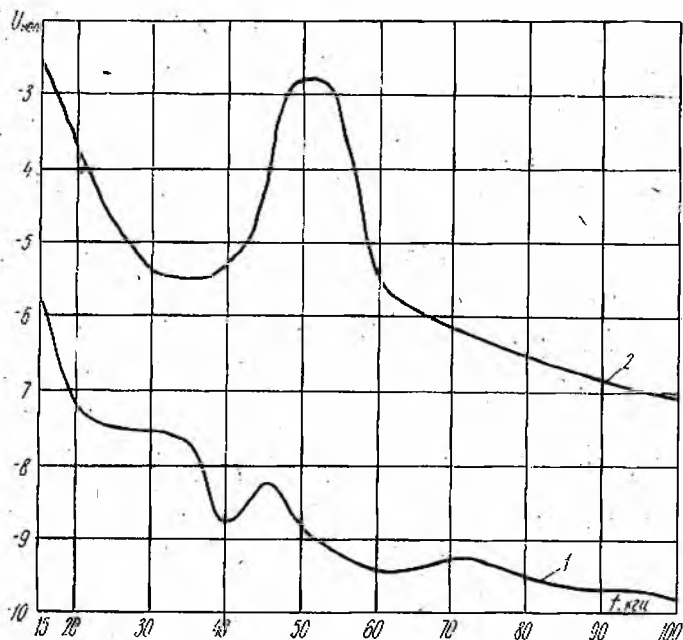


Рис. 3. Частотная характеристика среднего значения помех в высоковольтной сети шахты:
1 — при нормальном состоянии энергосети; 2 — при аварийном состоянии энергосети.

Статистическая обработка результатов измерений электрических помех предполагает:

а) определение среднего значения электрических помех для каждой реализации при большом времени осреднения (сутки) и построение спектральной характеристики;

б) построение эмпирических функций распределения амплитуд электрических помех и отыскание теоретического закона распределения на основании эмпирических данных;

в) построение кривых, характеризующих суточное изменение параметров распределения амплитуд электрических помех, возникающих с вероятностями 0,5; 0,75; 0,9 и 0,95.

Среднее значение электрических помех для каждой реализации определялось методом дискретной выборки по формуле (6) при времени осреднения, равном одним суткам. Построена спектральная характеристика изменения среднего значения помех в диапазоне частот от 15 до 100 кГц (рис. 3, кривая 1). Полученная кривая показывает изменение среднего значения электрических помех в высоковольтной сети шахты при нормальном состоянии энергосети и шахтного электрооборудования. На данной шахте отсутствуют также мощные зарядные устройства типа ЗУ-3, являющиеся источниками значительных помех.

При аварийном состоянии энергосети или электрооборудования (большие токи утечки в высоковольтном кабеле или частичный его про-

бой, коронный разряд на изоляторах масляных высоковольтных выключателей и т. п.) уровень электрических помех значительно возрастает. На рис. 3 кривая 2 показывает изменение максимального уровня помех в диапазоне частот при аварийном состоянии сети. Как правило, аварии

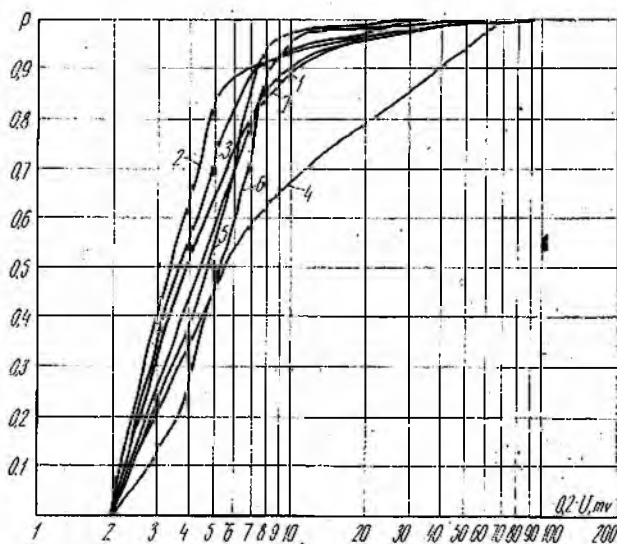


Рис. 4. Кривые распределения амплитуд электрических помех, полученные в течение одних суток ($f = 70 \text{ кгц}$):

1 — усредненная за 1 сутки; 2 — за 1 час в 05.00; 3 — в 14.00; 4 — в 16.00; 5 — в 10.00; 6 — в 02.00; 7 — в 22.00 часов.

в энергосети шахты быстро устраняются, а неисправное электрооборудование заменяется.

Существенный интерес представляет исследование закона распределения электрических помех в высоковольтной сети шахты. Для определения закона распределения амплитуд электрических помех сначала строят эмпирическую кривую распределения вероятностей, а затем стремятся найти теоретический закон распределения, наиболее полно совпадающий с эмпирическим.

Для построения эмпирической функции распределения вероятностей амплитуд результаты измерений подвергают статистической обработке. Для любой из исследуемых реализаций на каждой из частот исследуемого диапазона амплитуды помех группируются по интервалам, а затем определяются относительные частоты $\frac{m_i}{n}$, где m_i — количество импульсов в данном интервале, n — общее число импульсов в исследуемой реализации. График накопленной частоты $\sum \frac{m_i}{n}$ в зависимости от границ интервала представляет собой эмпирическую кривую распределения вероятностей амплитуд.

На рис. 4 изображены кривые распределения вероятностей амплитуд электрических помех. Аналогичные кривые были получены для реализаций на частотах 15, 20, 25, 60, 80 и 100 кгц.

Из кривых распределения видно, что характер закона распределения в разные часы суток одинаков, но существенно различаются параметры распределения. То же показывают кривые распределения для остальных частот диапазона.

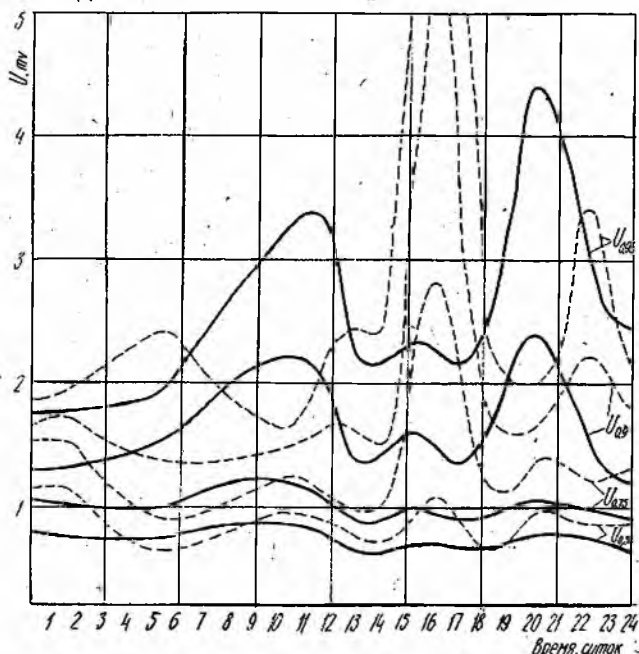


Рис. 5. Суточные колебания параметров распределения вероятностей амплитуд электрических помех.

Чтобы определить стабильность параметров распределения вероятностей амплитуд во времени, были проведены дополнительные исследования. Получены кривые распределения вероятностей амплитуд для различных моментов времени суток на каждой из исследуемых частот диапазона и построены графики зависимости параметров распределения $U_{0,5}$, $U_{0,75}$, $U_{0,9}$ и $U_{0,95}$ от времени суток. На рис. 5 показан один из таких графиков для частоты $f = 25$ кГц и $f = 70$ кГц. Параметры распределения вероятностей амплитуд $U_{0,5}$ и $U_{0,75}$ сравнительно мало изменяются в течение суток, в то время как $U_{0,9}$ и $U_{0,95}$ изменяются значительно.

Для стыкания теоретического закона распределения вероятностей на основании эмпирической функции распределения обычно стараются найти такую преобразующую функцию $f(x)$, которая приводит закон распределения к нормальному. Преобразующая функция $f(x)$ в таком случае распределяется нормально, и для построения закона распределения достаточно знать среднеквадратичное отклонение σ и среднее значение $f(x)$.

Особенности функции распределения вероятностей амплитуд электрических помех могут быть выяснены при сравнении эмпирических функций распределения с логарифмически-нормальным законом распределения (преобразующая функция $f(x) = \lg x$).

Функция распределения для логарифмически-нормального закона распределения имеет вид

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (11)$$

где

$$t = \frac{\lg x - \lg m}{\sigma}; \quad \lg m = \overline{\lg x}; \quad \sigma^2 = \sigma_{\lg x}^2.$$

Проверка эмпирических функций распределения на согласование с теоретическим логарифмически-нормальным законом распределения, про-

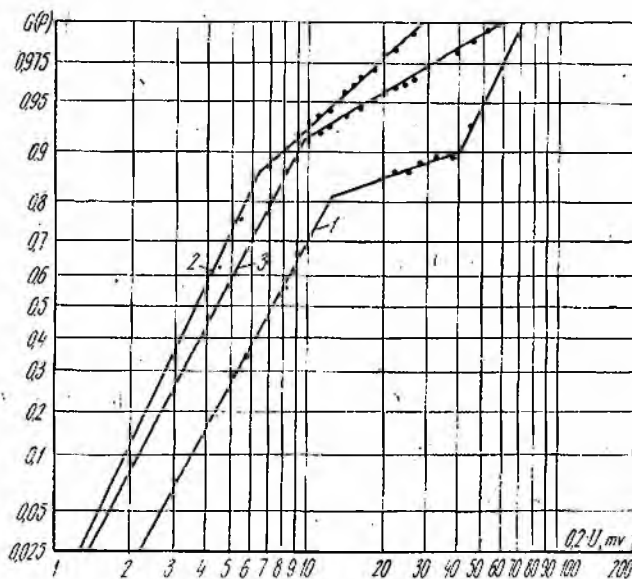


Рис. 6. Спрявленные диаграммы распределения амплитуд электрических помех:
1 — $f = 20$ кГц; 2 — $f = 25$ кГц; 3 — $f = 70$ кГц.

веденная по критериям согласия Колмогорова и χ -Пирсона, показала, что логарифмически-нормальный закон распределения мало пригоден для аппроксимации эмпирических функций распределения в большом диапазоне амплитуд электрических помех.

Для выяснения причин отклонения эмпирического распределения от теоретического логарифмически-нормального закона был принят метод спрявленных диаграмм [4]. Этот метод позволяет довольно точно отметить незначительные отклонения от предполагаемого закона. Сущность метода заключается в том, что эмпирические кривые распределения вычерчиваются на бумаге, разграфленной специальным образом. Шкала значений P заменяется шкалой $G(P)$. Функция $x = G(P)$, обратная функции $P = F(x)$, дает значения переменной, называемые квантилями. Кривая распределения в таких координатах изображается прямой линией, если распределение имеет в действительности функцию распределения $P = F(x)$.

Кривые распределения логарифмически-нормального закона изображаются на логарифмически-вероятностной бумаге, т. е. на бумаге с логарифмической шкалой по оси абсцисс и нормально-вероятностной шкалой по оси ординат, прямыми линиями с тангенсом угла наклона $\frac{1}{\sigma}$.

На рис. 6 представлены спрявленные диаграммы на логарифмически-вероятностной бумаге для нескольких кривых распределения. Как видно из рисунка, эмпирические кривые распределения вероятностей не аппроксимируются логарифмически-нормальным распределением. Спрявленные диаграммы такого вида характерны для неоднород-

ного логарифмически-нормального распределения вероятностей, образованного из двух однородных совокупностей, которые имеют логарифмически-нормальные распределения. Неоднородные распределения могут быть образованы при смешивании двух или даже нескольких генеральных совокупностей с разными параметрами.

При смешивании двух нормальных генеральных совокупностей обычно получаются асимметричные распределения, двухвершинные или кривые с более пологой вершиной, чем это имеет место для нормального распределения. Форма кривых неоднородных распределений определяется, с одной стороны, соотношением двух распределений, а с другой, — степенью различия параметров смешиваемых генеральных совокупностей.

Функции распределения для неоднородных генеральных совокупностей, образованных из двух нормальных, изображаются на вероятностной бумаге прямыми с разными углами наклона, каждая из которых изображает нормальное распределение.

В рассматриваемом случае можно считать, что суммарные электрические помехи в высоковольтной сети шахты имеют неоднородное распределение и образованы источниками помех различного характера и структуры. Плотность распределения суммарных электрических помех может быть выражена в виде

$$P(x) = \frac{\alpha_1}{\sigma_1} \varphi\left(\frac{\lg U_1 - \overline{\lg U_1}}{\sigma_1}\right) + \frac{\alpha_2}{\sigma_2} \varphi\left(\frac{\lg U_2 - \overline{\lg U_2}}{\sigma_2}\right), \quad (12)$$

где

$$(\alpha_1 + \alpha_2) = 1;$$

$$\varphi\left(\frac{\lg U_1 - \overline{\lg U_1}}{\sigma_1}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\lg U_1 - \overline{\lg U_1})^2}{2\sigma_1^2}\right].$$

Функция распределения

$$F(x) = \frac{\alpha_1}{\sigma_1} \Phi^*\left(\frac{\lg U_1 - \overline{\lg U_1}}{\sigma_1}\right) + \frac{\alpha_2}{\sigma_2} \Phi^*\left(\frac{\lg U_2 - \overline{\lg U_2}}{\sigma_2}\right), \quad (13)$$

где

$$\Phi^*\left(\frac{\lg U_1 - \overline{\lg U_1}}{\sigma_1}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U \exp\left[-\frac{(\lg U_1 - \overline{\lg U_1})^2}{2\sigma_1^2}\right].$$

ВЫВОДЫ

1. Суммарные электрические помехи в диапазоне частот 15—100 кГц имеют нестационарный характер с быстрой нестационарностью. Период нестационарности изменяется в значительных пределах — от нескольких минут до нескольких часов. Функция, определяющая нестационарность, сильно коррелирована со временем суток и рабочих смен шахты.

2. Среднее значение электрических помех в «нормальном» режиме работы энергосети шахты значительно отличается от среднего значения помех при аварийном состоянии сети электроснабжения.

3. Результаты первых экспериментальных исследований электрических помех показали, что закон распределения электрических помех не совпадает с логарифмически-нормальным. Можно считать, что суммарные электрические помехи имеют неоднородное распределение, образованное из двух логарифмически-нормальных распределений в определенной пропорции.

4. Характер кривых распределения электрических помех в течение суток одинаков, но существенно различаются их абсолютные значения. Функция распределения электрических помех зависит от нескольких параметров и не может быть однозначно определена средним значением и среднеквадратичным отклонением помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. Изд-во «Советское радио», 1966.
2. А. Ф. Котюк, В. В. Ольшевский, Э. И. Цветков. Методы и аппаратура для анализа характеристик случайных процессов. Изд-во «Энергия», 1967.
3. Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления, т. I. Изд-во «Советское радио», 1963.
4. А. Хальд. Математическая статистика с техническими приложениями. Изд-во иностр. лит., 1956.