
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОМЕХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ ГОРНЫХ ПОРОД

В. Н. Глинка, Г. М. Мясковский

УКРНИИ

Интерес к изучению промышленных электрических помех возник довольно давно. Оно сводилось в основном к количественной оценке уровней помех по квазипиковым значениям и к разработке средств помехоподавления. В качестве математического аппарата чаще всего использовалась теория цепей. Сравнительно недавно для изучения электрических помех был привлечен аппарат теории вероятностей и случайных процессов. Это объясняется новыми требованиями, выдвинутыми бурным развитием техники, автоматизацией производства, использованием счетно-решающих машин для управления технологическими процессами и целыми промышленными комплексами.

Центры управления, как правило, значительно удалены от управляемых объектов, и связующее их звено — канал связи — очень часто является узким местом всей системы. Это связано с многими причинами: искажением передаваемых сигналов, ограниченной пропускной способностью, действием помех, высокой стоимостью и др.

Очень возможно, что низкая эффективность систем связи и телемеханики объясняется их недоиспользованием из-за недостаточного знания процессов, которые в них протекают.

Серьезное изучение процессов, происходящих в различных каналах и аппаратуре связи, с привлечением новейших достижений теории вероятностей и случайных процессов, уже привело к значительному прогрессу в этой области.

Подобно тому как изучение микроструктуры строительных материалов позволило намного увеличить эффективность механических систем, изучение микроструктуры процессов в каналах и аппаратуре связи даст возможность повысить эффективность диспетчерских и телемеханических систем.

Изучение электрических помех можно разбить на несколько ступеней:

- а) количественная оценка уровней;
- б) статистический анализ помех как случайной величины, сводящийся к определению ряда числовых характеристик (математического ожидания, дисперсии, коэффициентов корреляции);
- в) отыскание устойчивых законов распределения вероятностей различных характеристик помех и нахождение параметров этих распределений;
- г) статистический анализ помех как случайных функций времени, включающий отыскание законов распределения вероятностей мгновенных значений и выбросов огибающей, длительностей выбросов, распределения фаз процесса, корреляционный анализ.

Разумеется, подход к помехе как к случайному процессу позволяет извлечь максимальную информацию о его микроструктуре, хотя и требует более сложного математического аппарата.

В самом общем виде помеха представляет собой нестационарный случайный процесс, охарактеризовать который можно только с помощью полного ансамбля всех его реализаций. Такая операция практически неосуществима. С некоторой степенью точности можно охарактеризовать помеху по ограниченному числу реализаций, однако получить ансамбль из нескольких десятков реализаций в удобном для обработки виде довольно сложно.

Выбрать наиболее рациональный способ обработки можно, пользуясь некоторыми статистическими свойствами помех.

Существующая классификация электрических помех совершенно не отражает их статистических свойств, поэтому изучать последние надо в каждом отдельном случае.

Способ обработки результатов измерений в большой степени зависит от двух факторов: стационарности и эргодичности случайного процесса.

Стационарным называется случайный процесс, статистические характеристики которого не зависят от времени. Часто встречаются процессы, статистические характеристики которых слабо зависят от времени, их называют квазистационарными [3].

Из определения ясно, что стационарный случайный процесс протекает во времени сравнительно однородно, и его статистические характеристики, определенные на одном отрезке времени, характеризуют с определенной точностью весь процесс. Это обстоятельство избавляет от необходимости многократного определения характеристик случайного процесса, соответствующих различным моментам времени.

Условия стационарности можно записать так:

- 1) $m_x(t) = m_x = \text{const}$;
- 2) $D_x(t) = D_x = \text{const}$;
- 3) $K_x(t; t + \tau) = K_x(\tau)$,

где $m_x(t)$ — функция математического ожидания;

$D_x(t)$ — функция дисперсии;

$K_x(t; t + \tau)$ — функция корреляций;

τ — интервал времени ($t - t_1$).

Необходимым и достаточным признаком стационарности может служить условие 3, так как оно включает в себя и условие 2. Условие 1 необязательно в связи с тем, что многие случайные процессы (особенно на выходе приемных устройств) вообще не содержат постоянной составляющей.

Эргодическое свойство случайного процесса состоит в том, что его статистические характеристики, определенные по совокупности его реализаций, равны (или почти равны) аналогичным характеристикам, определенным по одной реализации достаточной продолжительности. Необходимым и достаточным признаком эргодичности является стремление к нулю корреляционной функции при неограниченном возрастании интервала времени (при $m_x = 0$). $\lim_{\tau \rightarrow \infty} K(\tau) = 0$ (при $m_x = 0$) [3]. Из последнего выражения видно, что стационарность — следствие эргодичности.

Эргодические процессы можно анализировать по одной реализации достаточной продолжительности, что намного сокращает вычислительную работу и упрощает эксперимент.

Таким образом, судить о характере и свойствах изучаемого процесса можно по виду его корреляционной функции, которая может ответить и на

ряд других вопросов: о средней мощности, энергетическом спектре, происхождении процесса и т. д.

Статья ставит своей целью изложение методики расчета, построения и анализа корреляционной функции помехи, действующей в распределительной электросети рудного карьера. Этот вопрос приобрел особую актуальность в связи с работами по использованию РЭС в качестве каналов связи и телемеханики [1].

Исходным материалом является осциллографическая запись помехи, выполненная с помощью стандартного измерителя помех ИП-12-2М и шлейфового осциллографа МПО-2. Блок-схема измерений приведена на рис. 1. Катодный повторитель является элементом согласования выходной цепи измерителя помех со входной цепью осциллографа. Вся аппаратура предварительно проградуирована с помощью ГСС-6 по выходному прибору измерителя помех.

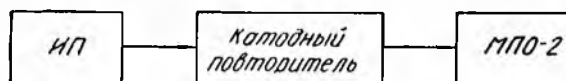


Рис. 1. Блок-схема измерений и записи помех в распределительной электросети.

Помеха измерена и записана на частоте 0,15 мГц при скорости движения ленты 2000 мм/сек, длина осциллограммы составляет в масштабе времени 8,5 мсек. Отрезок осциллограммы приведен на рис. 2. Фотографическая обработка выполняется с таким расчетом, чтобы процесс был достаточно хорошо развернут по оси времени (10—15 миллиметров на средний «период»).

Установим вначале связь между осциллограммой, записанной на выходе детектора измерителя, и исходным случайным процессом, воздействующим на его вход.



Рис. 2. Отрезок осциллограммы помехи.

Измеритель представляет собой селективную узкополосную систему, состоящую из ряда линейных (входная цепь, УП4) и нелинейных (преобразователь, детектор) элементов. При этом полоса пропускания определяется в основном линейными элементами. (Форма результирующей частотной характеристики близка к прямоугольной).

Как известно, широкополосный случайный процесс, «проходя» через линейную систему, полоса пропускания которой значительно уже спектра случайного процесса, принимает форму квадрата частотной характеристики. Кроме того, «проходя» через преобразователь, спектр помехи изменяется.

Таким образом, на входе детектора уже действует узкополосный случайный процесс.

$$\Delta f \ll f_0,$$

где $\Delta f = 9$ кГц — полоса пропускания измерителя;

f_0 — частота, на которой выполняются измерения.

Случайные процессы делятся на флуктуационные, импульсные и смешанные.

Флуктуационным обычно считают процесс, при котором отдельные выбросы не превышают трехкратного среднего значения.

Судя по осциллограмме, исследуемый процесс **флуктуационный**.

Флуктуационный случайный узкополосный процесс можно представить как множество синусоидальных колебаний со случайными амплитудами и фазами:

$$u(t) = U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)],$$

где $u(t)$ — мгновенные значения;

$U(t)$ — амплитуда;

$\varphi(t)$ — фаза.

Все три — случайные функции времени.

ω_0 — частота, на которой выполняются измерения.

Амплитуда случайного процесса меняется сравнительно медленно, поэтому приведенное выше выражение указывает на внешнее сходство этого процесса с амплитудно-модулированным колебанием высокой частоты.

Такое представление позволяет сделать следующие выводы:

а) в результате линейных и нелинейных преобразований случайный процесс на выходе измерителя существенно отличается от того же процесса на его входе; существенно различны и их статистические характеристики;

б) огибающая случайного процесса $U(t)$ «проходит» через измеритель как через линейную систему, подобно огибающей модулированного колебания, которое несет в себе полезный сигнал. Из теории радиоприемных устройств известно, что модулирующее колебание в результате «прохождения» по всему тракту приемника, включая низкочастотный, претерпевает нелинейные искажения, не превышающие $1 \div 5\%$. (Измеритель помех ИП-12-2м имеет нелинейные искажения порядка 3%).

Из изложенного следует, что

1) линейная система, как правило, не изменяет закона распределения случайного процесса;

2) воздействие однозначно определяет реакцию с помощью линейного оператора системы;

3) постоянная составляющая на выходе детектора отсутствует. Учитывать постоянную составляющую чаще всего нет необходимости (за исключением того случая, когда полезный сигнал представляет собой постоянное напряжение).

Таким образом, измеренный и записанный процесс представляет собой линейно преобразованную огибающую исходного случайного процесса — высокочастотной флуктуационной помехи в распределительной электросети.

Рассмотрим методику расчета корреляционной функции.

Исходная осциллограмма представляет собой непрерывную зависимость мгновенных значений огибающей ($мкв$) от времени ($мксек$).

Первая операция — дискретизация — осуществляется путем нанесения на осциллограмму масштабной сетки таким образом, чтобы получить более 100 интервалов времени. При этом длительность каждого импульса должна иметь не менее пяти интервалов. Масштаб напряжений выбирается так, чтобы получить удовлетворительную точность.

В нашем случае число интервалов $n = 135$, длительность каждого интервала $\tau_1 = 60 мксек$. Затем составляется таблица мгновенных значений напряжения помехи, соответствующих каждому из 135 моментов времени.

№ интервала времени (l)	1	2	3	4	5	6			135
Напряжение масштабных единиц ($U(t)$)	400	560	510	520	480	400			540

Полная таблица из-за громоздкости опускается.

Далее определяется математическое ожидание (среднее по времени) процесса:

$$m_x = \frac{\sum_{k=1}^n U_t}{n}.$$

Центрирование (исключение постоянной составляющей) производится вычитанием из каждого мгновенного значения математического ожидания:

$$\hat{U}_t = U_t - m_x,$$

где $\hat{U}_t$ — центрированное значение.

Операция математического ожидания, выполненная для квадратов центрированных мгновенных значений, определяет дисперсию:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{k=1}^n \hat{U}_t^2}{n}.$$

Дисперсия является первым элементом корреляционной матрицы, соответствующим нулевому интервалу времени ($\tau = 0$).

$$\sigma^2 = K(0),$$

где K_0 — значение корреляционной функции для нулевого аргумента.

Удобно корреляционную функцию выражать в нормированных значениях, т. е. отнесенных к величине дисперсии:

$$[K(\tau) \leq \sigma^2] \quad \rho(\tau) = \frac{K(\tau)}{\sigma^2},$$

где $\rho(\tau)$ — нормированная корреляционная функция.

В частности,

$$\rho(0) = \frac{K(0)}{\sigma^2} = 1.$$

Остальные значения корреляционной функции определяют, применяя операции математического ожидания (усреднение) к центрированным мгновенным значениям, сдвинутым друг относительно друга на интервал

$$\tau = \tau_1; \quad 2\tau_1; \quad 3\tau_1; \quad 4\tau_1 \dots l\tau \dots n\tau.$$

$$\rho(\tau) = \frac{\sum_{k=1}^{n-l} \hat{U}_{t_k} \cdot \hat{U}_{t_{k+l}}}{\sigma^2 \cdot (n-l)} < 1,$$

где l — номер интервала времени, определяющий его размер. (Поскольку речь идет об одной из возможных реализаций случайного процесса, то под корреляционной имеется в виду автокорреляционная функция).

Результаты вычислений сводятся в таблицу:

Интервал, м/сек	0	60	120	180	240	300	360
Корреляционная функция	1	0,42	-0,03	-0,043	-0,057	-0,03	-0,062

Разумеется, нет необходимости вычислять все значения корреляционной функции, так как при достаточно большом интервале она стремится к нулю или постоянной величине. На практике вычисления прекращают при значениях функции 3—5% от начального. В нашем случае получены следующие статистические характеристики: $m_x = 380$; $\sigma^2 = 7973$; $\sigma = 89$ (отличное от нуля математическое ожидание объясняется выбором масштаба).

График функции корреляции изображен на рис. 3. Значения функции довольно быстро спадают до нуля и далее колеблются вокруг величины $-0,05$. Это указывает на то, что огибающая обладает небольшой асимметрией среднего относительно оси времени. Оценим эту асимметрию количественно

$$\rho(\infty) = |0,05|.$$

Известно, что $K(\infty) = \rho(\infty)\sigma^2 = U_{\text{пост}}^2$ равно квадрату постоянной составляющей:

$$U_{\text{пост}} = \sqrt{0,05 \cdot 7973} = 20 \text{ ед.}$$

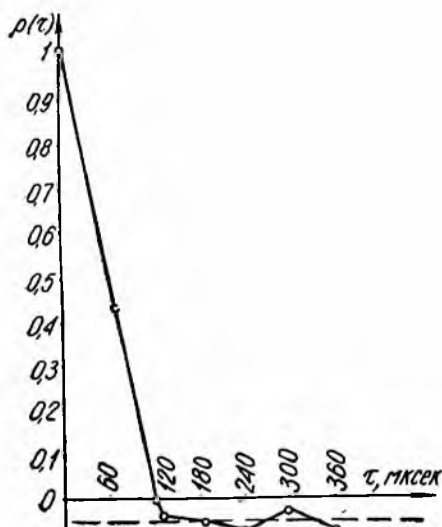


Рис. 3. Корреляционная функция.

Сравнивая эту величину с выбросами огибающей, значения которых достигают 800 ед., видим, что $U_{\text{пост}}$ не превышает 2,5÷5% и лежит в пределах точности вычислений.

Из чертежа видно также, что функция корреляции совершает колебания относительно $U_{\text{пост}}$, которые похожи на гармонические с периодом порядка 120 мксек ($t \approx 83,3 \text{ кГц}$). Это указывает на присутствие в составе случайного процесса незначительной гармонической составляющей.

Таким образом, если отбросить как незакономерную погрешность ($U_{\text{пост}}$), то можно утверждать, что выполняется условие:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \rho(\tau) = 0;$$

и исследуемый процесс обладает эргодическим свойством.

Выше было отмечено, что стационарность случайного процесса определяется зависимостью корреляционной функции только от интервала τ . Поэтому стационарность является необходимым, но недостаточным условием эргодичности и вытекает из него как следствие.

Вывод: огибающая в/ч помех в РЭС представляет собой низкочастотный флуктуационный стационарный случайный процесс, обладающий

эргодическим свойством. Из этого вывода вытекает ряд практически важных следствий:

1. Результаты измерений можно обрабатывать по одной реализации усреднением по времени.

2. Время корреляций $\tau_0 = 120$ мксек, поэтому процесс протекает довольно быстро и значения напряжения, разделенные интервалом больше 120 мксек, некоррелированы. В связи с этим усреднение можно производить с гораздо большим интервалом выборки, превышающим 120 мксек. Это значительно сократит вычислительную работу.

3. Корреляционная функция однозначно связана с энергетическим спектром процесса преобразования Фурье:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega;$$

$$F(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau.$$

По графику видно, что основная часть корреляционной функции хорошо аппроксимируется линейной функцией:

$$\rho(\tau) = \begin{cases} 0 < \tau < \tau_0 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0}\right) \\ \tau > \tau_0 & 0 \end{cases}.$$

Следовательно,

$$F(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\tau_0} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0}\right) \cos \omega\tau d\tau.$$

В результате интегрирования получаем

$$F(\omega) = \frac{2}{\pi\tau_0\omega^2} (1 - \cos \omega\tau_0)$$

при $\omega\tau_0 = 0 \quad F(0) = \frac{\tau_0}{\pi} = \frac{120}{\pi} \text{ (ед.)}$

График спектральной плотности представлен на рис. 4.

Как и следовало ожидать, спектральный состав огибающей характеризуется низкими частотами, так как все высокочастотные составляющие отфильтрованы фильтром нижних частот детектора.

Уравнение спектральной плотности содержит постоянную составляющую:

$$\frac{2}{\pi\tau_0\omega^2},$$

и гармоническую составляющую $-\frac{2}{\pi\tau_0\omega^2} \cos \omega\tau_0$, которая во всех случаях меньше постоянной. Основная частота спектра

$$f_0 = \frac{1}{4\tau_0} = \frac{10^6}{4 \cdot 120} \cong 2 \text{ кГц.}$$

Спектральная плотность в этой точке

$$F(0) = \frac{\tau_0}{\pi} = 38 \cdot 10^{-6}.$$

Относительные максимумы спектральной плотности соответствуют нечетным гармоникам основной частоты

$$f_u = f_0 K, \text{ (где } k = 1; 3; 5 \text{ и т. д.)}.$$

Спектральная характеристика указывает на быстрое затухание амплитуд гармоник с увеличением их номера. Первый относительный максимум составляет всего 8,7% от основного. Обращает на себя внимание то, что частоты спектра кратны частоте 50 гц.

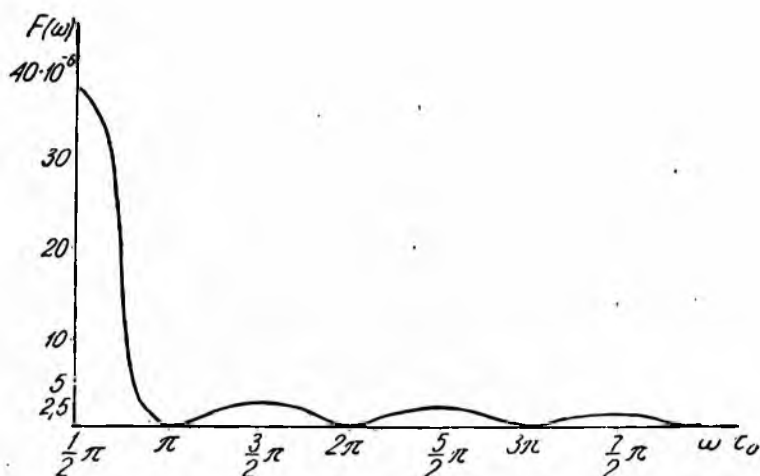


Рис. 4. Спектральная плотность процесса.

Таким образом, в результате выполнения корреляционного анализа случайного процесса на выходе узкополосного приемного устройства (измерителя помех) получены достаточно полные сведения, характеризующие различные стороны этого процесса и позволяющие значительно упростить вычисление других статистических характеристик, описать его структуру и т. д.

Правда, корреляционный анализ не дает ответа на ряд других не менее важных вопросов — о законах распределения вероятностей, фазовых характеристиках и т. д., которые решаются другими методами статистического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Ильин. Разветвленные силовые сети, как каналы связи для телемеханики, Госэнергоиздат, М., 1961.
2. А. В. Шереметьев, Р. Г. Житкевич. Обработка результатов измерений электрических характеристик методами математической статистики, Связьиздат, М., 1961.
3. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей, «Наука», М., 1964.
4. Б. Р. Левин. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике, «Сов. радио», М., 1960.