

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ СПЕКТРА ПОМЕХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАБОТЕ ШАХТНЫХ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОУСТРОЙСТВ

Е. Я. Иванченко, Н. А. Билан

Харьков

Глубокое исследование промышленных помех, возникающих в процессе работы шахтных электроустройств, имеет большое значение для разработки и внедрения помехоустойчивых систем связи и телемеханики. Особо мощными источниками промышленных помех являются коммутационные процессы, при которых происходит размыкание участка цепи с током или замыкание участка цепи с напряжением на разомкнутых контактах. Амплитуда отдельных всплесков, возникающих при этих процессах, может достигать значительной величины, крутизна их фронта иногда составляет сотни вольт в микросекунду. Как показали многочисленные исследования, спектр коммутационных помех охватывает весь используемый для телеграфии, телефонии, радиосвязи и телевидения диапазон частот, а плотность спектра отдельных импульсов изменяется в широком диапазоне.

Результаты экспериментальных исследований помех показали, что закон распределения амплитуд импульсных помех на выходе селективного устройства близок к логарифмически нормальному [1, 2]. Однако этот закон не учитывает параметры источника помех и поэтому невозможно заранее вычислить плотность их спектра.

В данной работе на основе физической сущности пробоя, показано, что логарифмически нормальный закон распределения спектральной плотности импульсных помех обусловлен разбросом длительности пробоя промежутка между контактами. Приводятся формулы для вычисления спектральной плотности помех при коммутации с учетом влияющих на процесс пробоя параметров коммутирующего устройства.

Для получения исходных данных рассмотрим процессы, возникающие при коммутации. Процесс замыкания или размыкания контактов характеризуется целой серией последовательных замыканий и размыканий сети, причем замыкание цепи характеризуется тем, что при небольших расстояниях между контактами, если к ним приложено силовое напряжение, возникает сильное электрическое поле. Под влиянием этого поля возникает автоэлектронная эмиссия электронов с поверхности катода [3]. Под действием эмиттированных электронов ионизируется межконтактная среда, что обеспечивает пробой промежутка между контактами. Ширину спектра ударной волны, возникающей при пробое, можно определить по известной формуле [4]

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t}. \quad (1)$$

Ударная волна быстро затухает, так как напряжение между контактами убывает.

Изменение напряжения на искровом промежутке хорошо описывается

падающей экспонентой, которая плавно приближается к своему значению, равному напряжению на дуговом разряде.

При дальнейшем протекании разряда напряжение на дуге между контактами остается практически постоянным.

На рис. 1 приведен график зависимости от времени напряжения на искровом промежутке. Полученный график определен экспериментальным путем.

Амплитуда помех при пробое намного выше, чем при дуге [5], поэтому в создании основного уровня помех при коммутации участвует напряжение только в начальной части кривой, показанной на рис. 1.

При различных значениях остаточного напряжения между контактами иногда происходит разрыв цепи и последующее восстановление напряжения между контактами.

Повторный пробой возникает лишь при достижении определенного критического для данного промежутка между контактами значения напряженности поля [6]. Поэтому процесс коммутации характеризуется различными по величине перепадами силового напряжения. Типичная осциллограмма этого процесса показана на рис. 2, а блок-схема для его исследования показана на рис. 3. Серия последовательных замыканий и размыканий сети возникает и в том случае, когда имеется небольшой зазор между неподвижными контактами, к которым приложено силовое напряжение, а также при кратковременном отрыве пантографа от контактной сети [7]. Многочисленные исследования показывают, что форма кривой напряжения на искровом промежутке между контактами не зависит от расстояния между контактами. Большинство источников коммутационных помех можно представить с некоторым приближением в виде обобщенной эквивалентной схемы (рис. 4), в которой к емкости контактов и приведенной

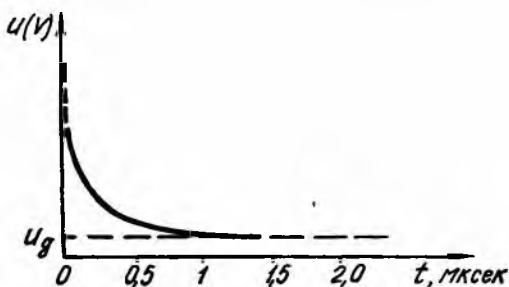


Рис. 1. График напряжения на искровом промежутке. U_d — напряжение на контактах при дуговом разряде.

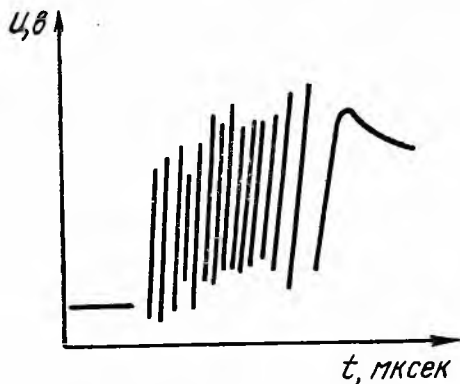


Рис. 2. Напряжение на контактах при их коммутации.

к ней емкости кабеля сети электроснабжения подается действующее значение э. д. с. источника E через общее активное сопротивление всей цепи r .

На время существования искры между контактами емкости C шунтируется сопротивлением искры r_u . Индуктивностью цепи при рассмотрении процесса обычно пренебрегают [3], так как она в этот период не оказывает существенного влияния.

Решением дифференциального уравнения, составленного для обобщенной эквивалентной схемы (см. рис. 4) при пробое между контактами, является следующее уравнение:

$$U_c = \frac{r_u E}{r + r_u} + \left(E - \frac{r_u}{r + r_u} E \right) \exp \left(- \frac{r + r_u}{r r_u C} t \right). \quad (2)$$

Обычно $r_u \ll r$ [6], тогда уравнение (2) можно упростить:

$$U_c = E \exp\left(-\frac{1}{\tau} t\right), \quad (3)$$

где $\tau = rC$.

Очевидно, что принятые нами допущения не оказывают существенного влияния на полученный результат, так как форма кривой (3) совпадает с экспериментально определенной формой напряжения на контактах при пробое (см. рис. 1).

Так как одиночный пробой существует кратковременно и описывается только частью кривой, показанной на рис. 1, то в образовании помех участвует только ограниченная временем существования

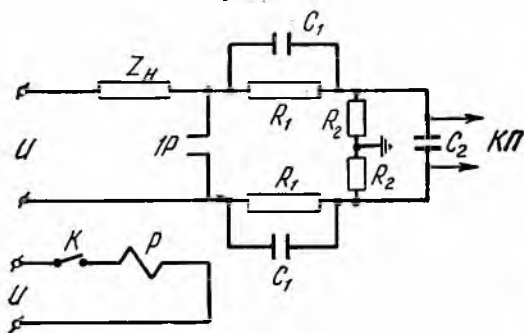


Рис. 3. Блок-схема для осциллографирования напряжения на контактах при коммутации. П — пластины вертикального отклонения осциллографа ОК-17М; P — катушка исследуемого контактора.

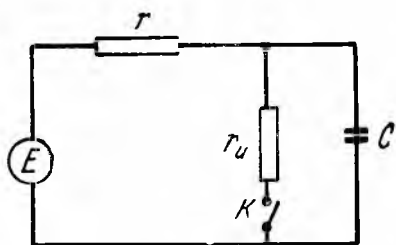


Рис. 4. Обобщенная схема коммутируемых цепей.

импульса часть процесса, уравнением (3). Аналитическое выражение напряжения на контактах для этого импульса будет иметь следующий вид:

$$U_n = E \exp\left(-\frac{1}{\tau} t_u\right) \quad (4)$$

при $0 \leq t_u \leq t_k$,

где t_k — момент времени окончания одиночного пробоя.

Момент времени возникновения пробоя можно всегда совместить со временем $t = 0$, так как при совмещении функции по шкале времени спектр ее не меняется [4].

Полученное выражение показывает, что процесс одиночного пробоя между контактами описывается емкостью коммутирующих устройств и емкостью кабеля, активным сопротивлением всей цепи r , длительностью пробоя t_u и э. д. с. источника питания.

Плотность спектра одиночного пробоя определяется интегралом Фурье, взятым в пределах длительности пробоя, и имеет следующий вид:

$$S_n = \frac{E}{j\omega + \frac{1}{rC}} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(j\omega + \frac{1}{rC}\right) t_k\right] \right\}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что плотность спектра одиночного процесса в общем случае зависит от напряжения между контактами E , при котором происходит пробой, от частоты ω , для которой рассматривается мешающее действие помехи, постоянной времени цепи разряда rC и от момента времени окончания пробоя t_k (момент времени возникновения каждого пробоя совмещен со временем $t = 0$). На длительность одиночного пробоя влияют многие факторы: связанная с механическими и элек-

тродинамическими силами в контактных соединениях вибрация, состояние ионизации межконтактного промежутка и т. д. Есть основание предположить, что распределение вероятности длительности времени пробоя подчинено нормальному закону распределения. Кроме того, для подобных случайных процессов, имеющих в зависимости от времени экспоненциальный характер, обычно принимают, что длительность процесса подчинена закону Гаусса [8, 9 и др.]. Поэтому функция вероятности для момента окончания пробоя имеет следующий вид:

$$g(t_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(t_k - t_{cp})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (6)$$

где

σ — стандартное отклонение для t_k ;

t_{cp} — среднее значение t_k .

Очевидно, что плотность спектра пробоя носит вероятностный характер, который обусловлен составляющей спектра

$$-\frac{E}{j\omega + \frac{1}{rC}} \exp \left[-\left(j\omega + \frac{1}{rC}\right)t_k \right]. \quad (6a)$$

Для определения функции плотности распределения вероятности спектра коммутационных помех преобразуем (5):

$$1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{E} S_n = \exp \left[-\left(j\omega + \frac{1}{rC}\right)t_k \right]. \quad (7)$$

Обратная функция для полученного уравнения (7) имеет вид

$$t_k = -\frac{1}{j\omega + \frac{1}{rC}} \ln \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{E} S_n \right). \quad (8)$$

Подставляя значение t_k из (8) в (6), получаем

$$g \left[-\frac{1}{j\omega + \frac{1}{rC}} \ln \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{E} S_n \right) \right] = \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{\left[-\frac{1}{j\omega + \frac{1}{rC}} \ln \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{E} S_n \right) - t_{cp} \right]^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (9)$$

Уравнение (9) показывает, что распределение логарифма случайной плотности спектра коммутационных помех непосредственно на контактах подчиняется нормальному закону с концом в точке максимальной амплитуды равной $S_n = 1$. Функцию плотности вероятности коммутационных помех можно определить, воспользовавшись следующим выражением [10]:

$$p(y) = g[f(y)]|f'(y)|, \quad (10)$$

где $p(y)$ — искомая функция плотности вероятности;

$g[f(y)]$ — функция плотности вероятности обратной функции, определяемая формулой (9);

$f'(y)$ — производная от обратной функции по переменной y (в нашем случае по S_n).

Подставляя исходные данные в (10), получим

$$p \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{E} S_n \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma} \left[E - \left(j\omega + \frac{1}{rC} \right) S_n \right]} \exp \times \\ \times \left\{ \frac{\left[-\frac{1}{j\omega + \frac{1}{rC}} \ln \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{E} S_n \right) - t_{cp} \right]^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет вычислить распределение плотности спектра коммутационных помех непосредственно на контактах, которые производят переключение в кабельной сети шахт.

Для вычисления плотности спектра одиночного пробоя на выходе присоединенного к контактам четырехполосника, коэффициент передачи которого $K(j\omega)$, следует пользоваться таким выражением:

$$S_{\text{вых}} = \frac{E}{j\omega + \frac{1}{rC}} K(j\omega) \left\{ 1 - \exp \left[-j\omega + \frac{1}{rC} \right) t_k \right\}, \quad (12)$$

где

$S_{\text{вых}}$ — плотность спектра одиночного пробоя на выходе четырехполосника.

Для определения функции плотности вероятности для коммутационных помех на выходе четырехполосника с известным коэффициентом передачи $K(j\omega)$ воспользуемся вышеприведенным методом. После некоторых вычислений получаем

$$p \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{K(j\omega)E} \cdot S_{\text{вых}} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma} \left[EK(j\omega) - S_{\text{вых}} \left(j\omega + \frac{1}{rC} \right) \right]} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{\left[-\frac{1}{j\omega + \frac{1}{rC}} \ln \left(1 - \frac{j\omega + \frac{1}{rC}}{K(j\omega)S_{\text{вых}}} \right) - t_{cp} \right]^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (13)$$

В данной работе получено уравнение плотности спектра одиночного пробоя как непосредственно на контактах, так и на выходе четырехполосника. Установлено, что спектральная плотность коммутационных помех подчиняется логарифмически нормальному закону. Полученные уравнения позволяют определять возникающие при коммутации помехи с учетом параметров сети и коммутирующего устройства.

Результаты экспериментального изучения помех [1, 2] подтверждают полученные выше результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Певницкий, А. Г. Француз. О статистических распределениях амплитуд импульсов радиопомех, создаваемых электроустройствами. «Электросвязь», 1958, № 9.
2. Л. Б. Венчиковский. Исследование помех в силовой сети напряжением 0,4/6 кв. «Автоматика и телемеханика», т. 21, № 8, 1960.
3. З. Л. Сена. Механизм возникновения дуги при разрыве цепи. «Техническая физика», т. 15, вып. 8, 1945.
4. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. Физматгиз, М., 1962.

5. Влияние дуг коротких замыканий на действие высокочастотных защит. «Energetica» (ЧНР), 1958, № 11.
6. Н. А. Капцов. Электрические явления в газах и вакууме. ГИТЛ, 1950.
7. И. А. Мимиа. Исследование радиошумов. Ежемесячный бюллетень. «Международная ассоциация железнодорожных конгрессов», 1962, № 9.
8. F. Kottler J. Franklin Inst, 1950, 250, N 4, 339.
9. В. С. Пугачев. Теория случайных функций. Физматгиз, 1962.
10. Л. Г. Махоткин. Статистика атмосферных радиопомех. «Геомагнетизм и аэрономия», вып. III, 1963, № 2.