

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОММУТАЦИОННЫХ ПОМЕХ В СИЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4 кВ

*И. Ф. Огороднейчук, И. П. Солоха, В. А. Секретная
В. П. Солоха*

Харьков

Среди импульсных помех, действующих в распределительных силовых сетях, особое место занимают помехи, возникающие на контактах при включениях и отключениях токоприемников с помощью пусковой и пуско-регулирующей аппаратуры. Уровни амплитуд напряжения коммутационных помех могут значительно превышать напряжение питающей сети, а энергетический спектр занимает широкую полосу частот. При проектировании аппаратуры ТУ — ТС, работающей по высокочастотному каналу связи, следует учитывать не только условия защищенности ее от воздействия коммутационных помех, но и обеспечение надежности при воздействии больших амплитуд напряжений помех на вход приемника и выход передатчика.

Выполнение этих требований необходимо в связи с тем, что количество включений и отключений токоприемников может быть большим. В шахтных участковых распределительных сетях число включений (а соответственно ему и число отключений) различных видов пускателей составляет до 4000 в сутки. Как при включениях, так и отключениях аппаратуры создаются в общем одинаковые по характеру помехи. Экспериментальные исследования коммутационных помех при использовании метода широкополосной записи показали, что процесс образования их при включении с физической точки зрения имеет две стадии. Первая — кратковременная ($t_{п.с} \leq 2 \cdot 5 \div 5 \cdot 10^{-5}$ сек) — сопровождается пробоем воздушного промежутка. Напряжение пробойных импульсов с крутизной переднего фронта $2 \div 3 \cdot 10^{-7}$ сек может достигать $U_{п.с} = 5U_c$. Эти импульсы в соответствии с параметрами коммутирующей цепи носят аперидический или колебательный характер. Длительность отдельных импульсов $t_{пр} = 3 \div 5 \cdot 10^{-6}$ сек.

В дальнейшем развитии стадия пробоя переходит в дуговой процесс, который характеризуется сравнительно низкими уровнями амплитуд напряжения на контактах, большими амплитудами тока и широкой полосой спектра занимаемых частот. Время действия дуги на контактах ($t_d \leq 5 \div 10 \cdot 10^{-3}$ сек) значительно превышает время действия пробоя воздушного промежутка и определяется амплитудой приложенного напряжения, угловой частотой питающего напряжения и скоростью сближения контактов. Очень редко встречается одноразовая коммутация при включении контактов, чаще из-за отскока контактов наблюдаются двух- или трехкратные коммутации при одном включении.

Максимально возможное время коммутации при включении контактов и приложенном переменном напряжении сети за один полупериод определяем из выражения

$$t_{ки} = \frac{1}{2f} \left(1 - \frac{\arcsin \frac{U_{пр}}{U_n}}{\pi} \right) \text{ сек,} \quad (1)$$

где f — частота питающего напряжения сети;

$U_{\text{пр}}$ — напряжение, при котором может произойти пробой воздушного промежутка;

$U_{\text{п}}$ — пиковое значение питающего напряжения сети

$$U_{\text{п}} = \sqrt{2} U_{\text{мах}}, \text{ в.}$$

Время, обусловленное скоростью сближения контактов $v_{\text{к}}$, можно найти из выражения

$$t_{\text{кв}} = \frac{\Delta_{\text{кр}}}{v_{\text{к}}} = \frac{\Delta_{\text{кр}}}{\sqrt{2g L_{\text{к}}}}, \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{кр}}$ — расстояние между контактами, когда при заданном напряжении происходит пробой воздушного промежутка;

$L_{\text{к}}$ — расстояние между разомкнутыми контактами.

В современных конструкциях пускателей, когда ускорения контактов при замыкании достигают значений $g = 8 \text{ м}^2/\text{сек}$, определяющим в условиях коммутации является время $t_{\text{кв}} \leq t_{\text{ки}}$.

Найдем время $t_{\text{кв}}$ через параметры коммутируемой цепи

$$\Delta_{\text{кр}} = \frac{(U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}) U_{\text{п}} k}{E_{\text{пр}} U_{\text{пр}}},$$

тогда

$$t_{\text{кв}} = \frac{(U_{\text{пт}} \sin \omega t - U_{\text{пр}}) U_{\text{п}} k}{E_{\text{пр}} v_{\text{к}}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{пр}} = 5,3 \cdot 10 \text{ в/м}$ — величина пробойного напряжения для воздуха при плоских контактах;

$$k = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}}.$$

При размыкании контактов также наблюдаются две стадии развития процесса коммутации. Однако развитие стадий протекает в порядке, обратном процессу коммутации при включении.

От длительности процесса при размыкании контактов зависит время $t_{\text{ки}} \leq t_{\text{кв}}$. Повторные отскоки при выключении пусковой аппаратуры не наблюдаются. Время существования коммутационной помехи при выключении определяется выражением

$$t_{\text{ки}} = \frac{1}{2f} \left(1 - \frac{\arcsin \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{п}}}}{\pi} \cos \varphi \right) \text{ сек.} \quad (4)$$

Статистические характеристики распределения длительностей коммутационных процессов вычислены на основе обработки осциллограмм записей помех при включениях и отключениях различных двигателей шахтных машин.

Для удобства математической обработки с целью получения непрерывного интервального ряда значения длительностей импульсов дуги разбивались на интервалы. Оптимальную величину интервала, при котором вариационный ряд не будет очень громоздким и в нем не исчезнут присущие ему закономерности, выбираем с помощью формулы

$$i = \frac{x_{\text{мах}} - x_{\text{мин}}}{1 + 3,322 \lg N}, \quad (5)$$

где N — число наблюдений;

$x_{\text{мах}}, x_{\text{мин}}$ — соответственно верхняя и нижняя границы интервального ряда.

В результате группировки данных по интервалам получаем распределение длительностей импульсов дуги и производим первую графическую проверку построением столбиковой эмпирической гистограммы, которая имеет явно выраженный показательный характер. Затем находим среднее значение длительности импульса дуги, воспользовавшись выражением

$$\tau = \frac{\sum m\tau}{\sum m},$$

где τ — значение центров интервалов;

$\sum m$ — сумма частот.

Для данных при включении пускателя

$$\tau = 1,78 \text{ мксек.}$$

При этом среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum m\tau^2}{\sum m} - (\tau)^2}.$$

При включении пускателя $\sigma_\tau = 2,65 \text{ мксек.}$ Для показательного распределения характерно $\sigma_\tau \cong \tau$. Если такое соотношение приблизительно выдерживается, то можно ограничиться этой проверкой, в противном случае дальнейшая проверка предполагает определение теоретических частот и сравнение их с эмпирическими. Выравнивание эмпирической кривой лучше всего производить по более простой формуле интегральной функции, выражающей показательный закон

$$1 - F(t) = e^{-\lambda t},$$

где $1 - F(t)$ — вероятность, приблизительно равная накопленной частоте $\frac{m}{\sum m}$;

λ — параметр показательного закона распределения;

e — основание натуральных логарифмов.

Пользуясь эмпирическими данными, можно определить

$$\lambda = \frac{1}{\tau}; \lambda_{\text{вкл}} = 0,561.$$

Расчет теоретического закона распределения для длительностей импульсов дуги при включении пускателя производим согласно данным табл. 1.

Находим теоретическую величину λ :

$$a = \frac{\lg \sum p}{\sum t_i},$$

где t_i — начало интервалов длительности импульсов дуги.

Отсюда

$$\lambda = \frac{a}{-\lg e}.$$

При включении пускателя

$$\lambda_{\text{теор}} = 0,526.$$

Теоретическое значение частот, определенное по выражению $p' = 1 - e^{-\lambda t_i + 1}$, показывает удельный вес теоретических частот данного интервала в общем количестве наблюдений.

Последняя проверка заключается в определении близости эмпирического распределения к теоретическому. Для этого предварительно вычисляем критерий « χ^2 -квадрат» К. Пирсона:

$$\chi^2 = N \left(\sum \frac{p^2}{p'} - 1 \right).$$

Таблица 1

Проверка распределения длительностей дуги по показательному закону при включении пускателя

Начало интервала t_i	Конец интервала t_{i+1}	Средняя интервала $\bar{t} = \tau$	Число повторений m	$m\tau$	$m\tau^2$	$p = \frac{m}{N}$	Σp $\tau < t_{i+1}$	Σp $\tau > t_i$	$\lg \Sigma p$	λt_{i+1}	$\frac{1}{\lambda} - t_i$	$p' = \frac{m'}{N}$	$m' = p'N$	p^2	$\frac{p^2}{p}$
0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	$\lambda \cdot 0 = 0$	$p = 1$	0	0	0	0
0,1	1,29	0,695	297	206,415	143,4310	0,5646	0,5646	0,9994	0	0,67854	0,5066	0,4934	259,52	0,3187	0,6459
1,29	2,48	1,885	122	229,970	3275,866	0,2320	0,7966	0,4348	1,6383	$0,526 \times 1,30448$	0,2725	0,2341	123,13	0,0538	0,2298
2,48	3,67	3,075	53	162,975	501,1415	0,1	0,8966	0,2028	1,3071	1,93042	0,1496	0,1229	64,64	0,01	0,0813
3,67	4,86	4,265	15	63,975	272,8530	0,0280	0,9255	0,1028	1,0119	2,55636	0,0743	0,0753	39,50	0,0008	0,0106
4,86	6,05	5,455	16	87,280	47,6112	0,0304	0,9559	0,0739	2,8686	3,18230	0,0408	0,0335	17,62	0,0009	0,0268
6,05	7,24	6,645	9	59,805	40,4604	0,0171	0,9730	0,0435	2,6385	3,80824	0,0224	0,0184	9,68	0,0003	0,0163
7,24	8,43	7,835	7	54,845	429,7104	0,0131	0,9861	0,0264	2,4216	4,43418	0,0123	0,0101	5,31	0,0002	0,0198
8,43	9,62	9,025	3	27,075	244,3518	0,0057	0,9918	0,0133	2,1239	5,06012	0,0061	0,0062	3,26	0	0
9,62	10,81	10,215	2	20,430	208,692	0,0038	0,9956	0,0076	3,8808	5,68606	0,0034	0,0027	1,42	0	0
10,81	12,00	11,405	2	22,810	260,148	0,0038	0,9994	0,0038	3,5798	6,312	0,0018	0,0016	0,84	0	0
$\Sigma 54,55$			$\Sigma 526$	$\Sigma 935,58$	$\Sigma 5424,2653$	$\Sigma 0,9994$			$\Sigma - 12,5285$			$\Sigma 0,9983$	$\Sigma 525,02$		$\Sigma 1,0305$

$$\bar{\tau} = \frac{\Sigma m\tau}{\Sigma m} = 1,78$$

$$\chi^2 = N \left(\frac{p^2}{p} - 1 \right) = 16,04$$

$$\bar{\sigma}_{\tau} = \sqrt{\frac{\Sigma m\tau^2 - \frac{(\Sigma m\tau)^2}{\Sigma m}}{\Sigma m}} = 2,65$$

$$\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} = \frac{16,04 - 8}{4} = 2,01 < 3$$

По данным табл. 1 $\chi^2 = 16,04$.

Далее используем критерий согласия К. Пирсона по методике В. И. Романовского:

$$\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} \leq 3,$$

где k — число степеней свободы вариации, определяющееся как разность между количеством интервалов и числом исчисленных статистических характеристик (в показательном распределении такими характеристиками являются λ и Σm , т. е. $k = 2$).

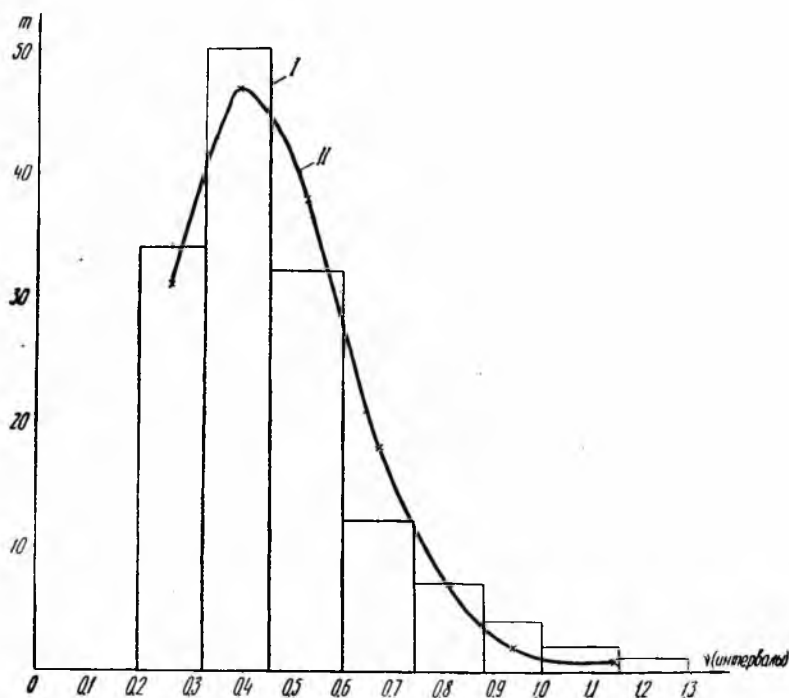


Рис. 1.

Произведенные расчеты показали, что $\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} = 2,01 < 3$, поэтому теоретическое распределение согласуется с опытными данными (рис. 1).

Результаты обработки осциллограмм коммутационных помех с целью выяснения закона распределения их амплитуд приведены в табл. 2.

Установлено, что распределение значений амплитуды при включении пусковой аппаратуры подчиняется закону Пуассона, математическая интерпретация которого выражается формулой

$$p' = \frac{\lambda^{x_i}}{x_i!} e^{-\lambda},$$

где p' — теоретическая вероятность величины амплитуды;

x_i — значения величин амплитуд;

λ — параметр закона распределения, определяемый как

$$\lambda = \bar{x} = \frac{\Sigma mx}{\Sigma m}.$$

Таблица 2

Распределение амплитуды дуги при включении пускателя

Интервалы	Центры интервалов	Число повторений	$x_i = \frac{x - x_{\min}}{l}$	$x_i m$	$x_i^2 m$	$x_i \lg \lambda$	λ^{x_i}	$\frac{\lambda^{x_i}}{x_i!}$	$p' = \frac{\lambda^{x_i}}{x_i!} e^{-\lambda}$	$m' = p' \Sigma m$	$(m - m')^2$	$\frac{(m - m')^2}{m'}$	Накопленные частоты p'
0,2 — 0,3375	0,26875	34	0	0	0	0	1	1	0,2169	31	9	0,290	0,2169
0,3375 — 0,4750	0,40625	50	1	50	50	0,1841	1,528	1	0,3314	47	9	0,192	0,5483
0,4750 — 0,6125	0,54375	32	2	64	128	0,3682	2,334	2	0,2531	36	16	0,444	0,8014
0,6125 — 0,75	0,68125	12	3	36	108	0,5523	3,567	6	0,5945	18	36	2,000	0,9303
0,75 — 0,8875	0,81875	7	4	28	112	0,7364	5,450	24	0,0227	7	0	0,000	0,9795
0,8875 — 1,025	0,95625	4	5	20	100	0,9205	8,328	120	0,0694	2	4	2,000	0,9945
1,025 — 1,1625	1,09375	2	6	12	72	1,1046	12,89	720	0,0179	1	4	4,000	0,9983
1,1625 — 1,30	1,23125	1	7	7	49	1,2887	13,45	5040	0,0027	0,0006			0,9989
		$\Sigma 142$		$\Sigma 217$	$\Sigma 619$				$\Sigma 0,9989$	$\Sigma 142$		$\Sigma^2 = 8,926$	

$$\bar{x} = \frac{\Sigma xm}{\Sigma m} = \frac{217}{142} = 1,5281 = \lambda; \quad \lg \lambda = 0,1841; \quad e^{-\lambda} = e^{-1,528} = 0,2169;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma x_i^2 m}{\Sigma m} - (\bar{x})^2} = \sqrt{\frac{619}{142} - 1,5281^2} = 1,4 < \bar{x};$$

$$\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} = \frac{8,926 - 6}{\sqrt{12}} = \frac{2,926}{3,46} = 0,846 < 3.$$

Согласно данным табл. 2, средняя величина амплитуды при включении пускателя $\lambda = \bar{x} = 1,528$ (в относительных единицах), что составляет примерно 153 мв.

Близость эмпирического и теоретического распределения проверялась также с помощью «критериев согласия» К. Пирсона, применительно к методике В. И. Романовского

$$\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} = 0,846 < 3.$$

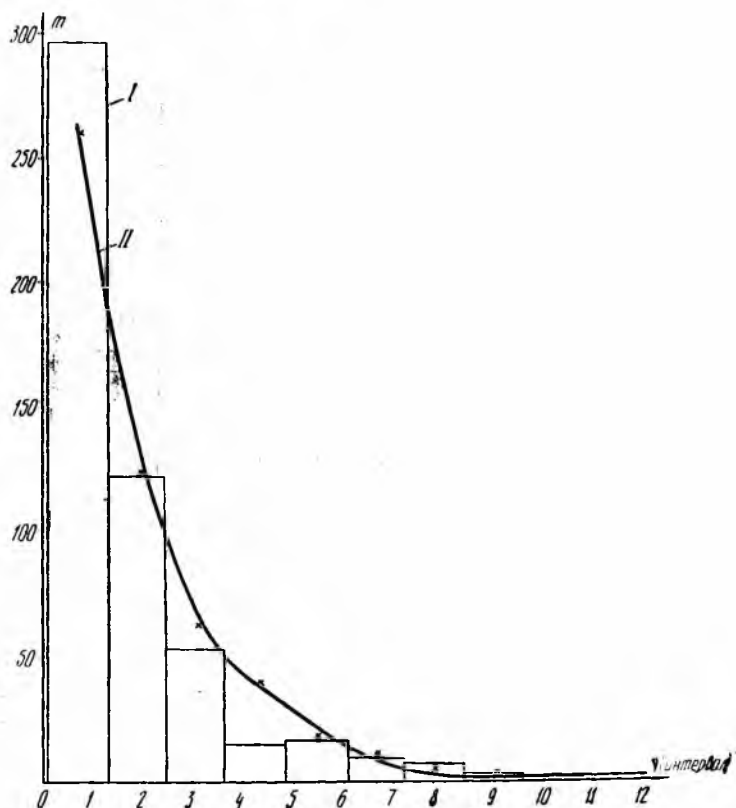


Рис. 2.

Проверка показала, что теоретическое распределение согласуется с эмпирическим (рис. 2).

На рис. 3 изображена кривая распределения вероятностей появления значений длительности дуги и накопления (кумулятивная кривая).

На рис. 4 показана кривая распределения вероятности появления определенных значений амплитуд и соответствующая ей кумулятивная кривая.

С помощью кумулятивных кривых можно с вероятностью $P = 0,95$ установить предельные границы, которые не превысят величины длительности дуги и амплитуды (точка В).

С помощью кривых распределения вероятностей значений длительностей и амплитуд можно установить их значение.

Так, для τ дуги наиболее вероятное значение составляет 0,76 мсек, а для амплитуды дуги — 0,4 в.

Уровни амплитуд напряжений дугового процесса на контактах пуска-

телей зависят от мощности коммутируемых токоприемников и могут быть определены по эмпирической формуле, полученной на основе обработки экспериментальных данных

$$U_d = \frac{U_{\max} - 300}{10 P} \text{ в},$$

где $U_{\max}$ — максимальное значение напряжения сети, в;
 P — мощность коммутирующих токоприемников, *квт.*

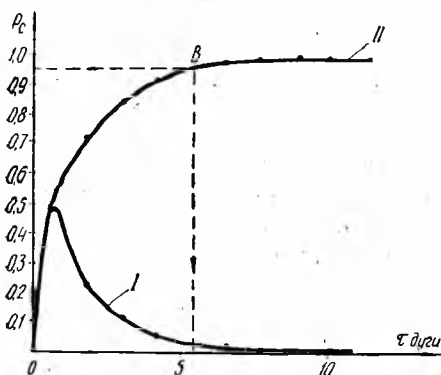


Рис. 3.

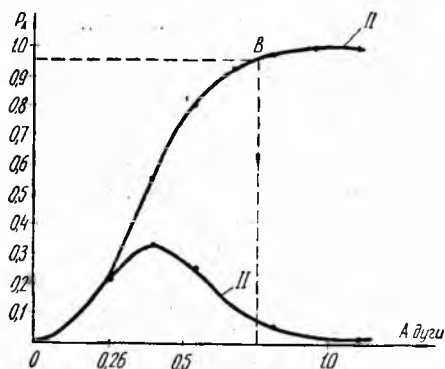


Рис. 4.

Обработанные авторами таким же образом экспериментальные данные по определению законов распределения при отключении пускорегулирующей аппаратуры из-за обширности материала не приводятся.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Распределение длительностей дуги коммутационной помехи как при включении, так и при отключении контактов пусковой аппаратуры подчинено показательному закону.

2. Распределение амплитуд напряжений помех от дугового разряда в межконтактном промежутке в случаях включения — отключения контактов соответствует закону Пуассона.