

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАТИЧЕСКИХ ТОКОВ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ

В. И. ГУРЕВИЧ, Ю. В. ЖУКОВСКИЙ, П. И. САВЧЕНКО

Статический ток управления I_y силовых тиристоров является важнейшим параметром, от которого зависит помехоустойчивость тиристоров, мощность системы управления, динамическая теплостойкость и некоторые другие важные характеристики [1]. Как показали проведенные исследования [2], от значения I_y в некоторых случаях зависят не только параметры системы управления, но и характеристики нагрузки, в частности, ток холостого хода, коэффициент мощности, потери эл. энергии и др.

Справочные данные заводов-изготовителей содержат сведения лишь о предельных значениях I_y , а аналитические выражения для расчета I_y [3, 4] содержат большое количество геометрических и электрофизических параметров, которые не остаются постоянными в процессе изготовления структуры и не известны к концу технологического цикла. В связи с этим предлагается вероятностная оценка статических токов управления силовых тиристоров. Необходимые для расчетов массовые измерения I_y выполнены с помощью разработанного авторами прибора непосредственно в производственных условиях на Саранском заводе «Электровыпрямитель» и ПО ХЭМЗ им. 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции.

Полученные гистограммы показали наличие значительного (более чем в 200 раз) разброса значений I_y у тиристоров даже одного типа. Исследованию подвергались выборки тиристоров различных заводов-изготовителей типов: Т-50, Т-160, ТД250, Т2-320.

Рассмотрим методику вычисления статистических характеристик на примере тиристоров Т2-320.

Введя обозначение $X = 50I_y$ [мА] и проведя группировку экспериментальных данных, рассчитаем моменты распределения

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i n_i = 5,05;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 n_i = 7,065; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{S^2} = 2,66.$$

где $n = \sum n_i$ — количество измерений.

По виду гистограммы, рис. 1 полагаем, что случайная величина ξ имеет усеченное нормальное распределение с параметрами a и σ , характеризуемые выражением

$$f(x, a, \sigma) = \frac{\mu}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (x \geq 0). \quad (2)$$

Приняв отношение параметров распределения $\frac{a}{\sigma} = 1,562$, находим μ из условия

$$\int_0^{\infty} f(x, a, \sigma) dx = 1. \quad (3)$$

Полагая $(x-a)/\sigma = t$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx &= \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a/\sigma}^{a/\sigma} e^{-t^2/2} dt = \mu \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{1,562} e^{-t^2/2} dt = \\ &= \mu \cdot 0,943 = 1, \end{aligned}$$

откуда $\mu = 1,0604$

Математическое ожидание распределения может быть найдено из выражения:

$$\begin{aligned} M_{\xi} &= \frac{\mu}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} X e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a/\sigma}^{\infty} (a + t\sigma) e^{-t^2/2} dt = \\ &= a + \sigma\mu\varphi\left(\frac{a}{\sigma}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$ [5].

Формулу (5) можно переписать в виде:

$$M_{\xi} = \sigma \left[\frac{a}{\sigma} + \mu\varphi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \right] = \sigma \cdot 1,688, \quad (6)$$

откуда, принимая $M_{\xi} \approx X$, находим значение параметров:

$$\sigma = 2,99 \text{ и } a = 4,67.$$

Подставив найденные значения в (2), получим:

$$f(x, a, \sigma) = \frac{1,06}{2,99\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-4,67)^2}{17,88}} = 0,14 e^{-\frac{(x-4,67)^2}{17,88}}. \quad (7)$$

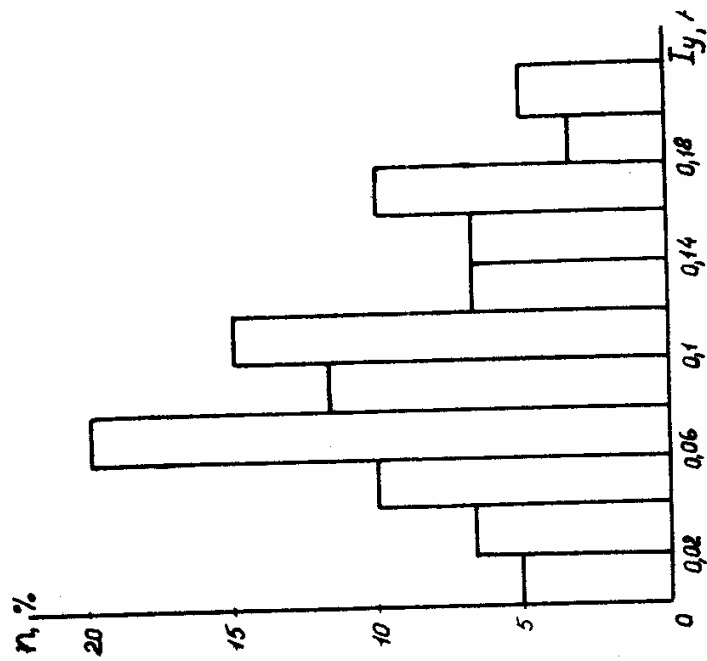


Рис. 1. Гистограмма распределения I_y тиристоров типа Т2-320.

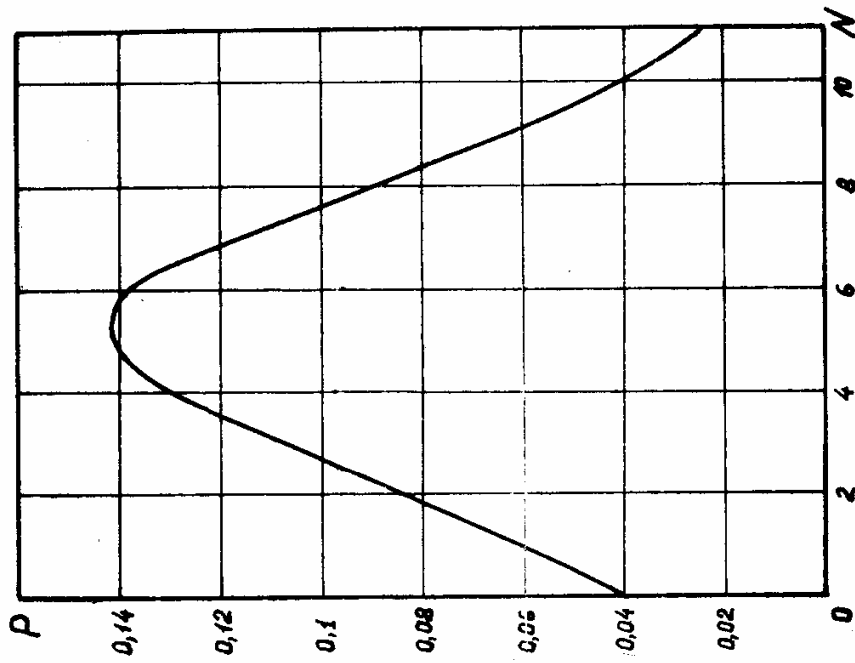


Рис. 2. Вероятность попадания тиристоров типа Т2-320 в соответствующий интервал: для $N=1$, $I_y=0 \div 0,02$ А; для $N=2$, $I_y=0,02 \div 0,04$ А; для $N=3$, $I_y=0,04 \div 0,06$ А и т. д.

Найдем M_{ξ}^2

$$M_{\xi}^2 = \frac{\mu}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} x^2 e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{a}{\sigma}}^{\infty} (a+t\sigma)^2 e^{-t^2} dt =$$

$$= a^2 + \sigma^2 + a\sigma\mu\varphi\left(\frac{a}{\sigma}\right). \quad (8)$$

После чего можно найти дисперсию распределения:

$$D_{\xi} = M_{\xi}^2 - (M_{\xi})^2 = \sigma^2 - \sigma\mu\varphi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \left[a + \sigma\mu\varphi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \right] = 7,036, \quad (9)$$

что хорошо согласуется с найденным значением S^2 .

Вероятность попадания в интервал $[b_1, b_2]$, может быть получена из выражения:

$$P = \frac{\mu}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{b_1}^{b_2} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = \mu \left[\Phi\left(\frac{b_2-a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{b_1-a}{\sigma}\right) \right], \quad (10)$$

Результаты расчета по (10) отображены графически на рис. 2.

Проверим гипотезу о предполагаемом законе определения (2) по критерию согласия К. Пирсона — χ^2 путем сравнения теоретических n'_i и эмпирических n_i частот:

$$\chi_{\text{табл.}}^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} = \sum \frac{n_i^2}{n'_i} - n.$$

Если при данном уровне значимости P для данного числа степеней свободы $K = s - 3$. (s — число частотных интервалов) выполняется условие:

$$\chi_{\text{табл.}}^2 < \chi_{\text{кр.}}^2(P, K),$$

то нет оснований отвергать гипотезу.

По результатам расчета составляют таблицу и находят значения $\chi_{\text{табл.}}^2$ [5].

В данном случае $\chi_{\text{табл.}}^2 = 6,077$. При уровне значимости:

$$P = 0,5 \text{ и } K = 8, \chi_{\text{кр.}}^2(0,5; 8) = 7,34 \text{ [5].}$$

То есть при этом уровне значимости можно принять распределение (7)

Учитывая, что $I_y = \frac{1}{50}X$, получим закон распределения I_y

в виде:

$$P(X_{I_y}, a, \sigma) = 7,075 e^{-\frac{(50X_{I_y} - 4,67)^2}{17,88}}.$$

Параметр	Т2 — 320	ТД—250	Т—160	Т—50
\bar{x}	5,05	3,55	3,26	1,55
s	2,658	2,089	2,12	0,64
a/σ	1,562	1,155	0,78	2,32
μ	1,06	1,135	1,28	1,009
σ	2,99	2,536	2,82	0,66
a	4,67	2,93	2,2	1,53
$f(x, a, \sigma)$	$0,14 \exp \left[-\frac{(x-4,67)^2}{17,88} \right]$	$0,1786 \exp \left[-\frac{(x-2,93)^2}{12,86} \right]$	$0,18 \exp \left[-\frac{(x-2,2)^2}{15,9} \right]$	$0,61 \exp \left[-\frac{(x-1,53)^2}{0,87} \right]$
$P(X, I_y, a, \sigma)$	$7,075 \exp \times \frac{(50X_{I_y} - 4,67)^2}{17,88} \times \left[-\frac{\dots}{17,88} \right]$	$8,93 \exp \times \frac{(50X_{I_y} - 2,93)^2}{12,86} \times \left[-\frac{\dots}{12,86} \right]$	$9 \exp \left[-\frac{(50X_{I_y} - 2,2)^2}{15,9} \right]$	$30,5 \exp \times \frac{(50X_{I_y} - 1,53)^2}{0,87} \times \left[-\frac{\dots}{0,87} \right]$

Аналогичным образом рассчитаны статистические параметры для тиристоров других типов, результаты которого представлены в таблице 1.

Как оказалось, с вероятностью $P=0,99$ можно утверждать, что для тиристоров Т2—320 $I_y \leq 0,22A$, в то время как в справочных материалах приводится значение $I_y \leq 0,4A$. Аналогичные соотношения характерны и для тиристоров других типов. Обеспечив отбраковку редких экземпляров тиристоров со значением I_y , превышающим полученное при $P=0,99$ (не исключая их применение в других схемах), можно существенно снизить расчетное значение I_y , что очень важно при определении параметров системы управления, например при расчетах критического тока нагрузки для встречно-параллельно включенных тиристоров с самоуправлением [2].

ВЫВОДЫ

По предложенной методике может быть составлен каталог вероятностных характеристик I_y для всех выпускаемых промышленностью тиристоров. По мнению авторов вероятностные характеристики статических токов управления дадут разработчикам аппаратуры более полную информацию, чем приводимые в настоящее время в справочных материалах предельные значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабунцов В. А., Тугов Н. М. Динамические режимы эксплуатации мощных тиристоров. — М.: Энергия, 1977, — 192 с.
2. Гуревич В. И., Покатаев А. И., Савченко П. И. Исследование работы встречно-параллельно включенных тиристоров с самоуправлением. — Техническая электродинамика, 1982, № 1, с. 29—34.
3. Дерменжи П. Г., Евсеев Ю. А. Статические токи управления $p-n-p-n$ -структур большой площади. — Радиотехника и электроника, 1977, № 11, с. XVII, с. 2365—2378.
4. Дерменжи П. Г. Статические токи управления $p-n-p-n$ структур, обладающих цилиндрической симметрией. — Электротехн. пром-сть. Сб. Преобразовательная техника, 1974, вып. 2 (49), с. 5—6.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.