

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАРАСТАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ИМПУЛЬСА ТОКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Петков А.А., к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"  
тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

*У роботі запропоновані співвідношення для визначення математичного очікування й дисперсії часу наростання значень випробувального імпульсу струму. Показано їхнє використання для оцінки ймовірності безвідмовної роботи випробувального пристрою.*

*В работе предложены соотношения для определения математического ожидания и дисперсии времени нарастания значений испытательного импульса тока. Показано их использование для оценки вероятности безотказной работы испытательного устройства.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Одним из основных мероприятий, обеспечивающим безотказную работу оборудования, применяемого в системах энергогенерирования и электропередачи, является проведение испытаний на устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных факторов, сопровождающих его эксплуатацию. В общем случае процесс испытаний оборудования, тип используемых испытательных устройств и требования к параметрам испытательных импульсов регламентируются международными, государственными, отраслевыми и другими нормативными документами. Требования к значениям параметров импульсов в нормативных документах формулируются путем задания их номинального значения и допустимого интервала значений, определяемого допустимыми отклонениями. В связи с этим, при проектировании и сооружении испытательных установок должны выполняться мероприятия, обеспечивающие надежное формирование испытательных импульсов с параметрами, не выходящими за допустимый интервал изменения значений.

**Анализ публикаций.** Надежность эксплуатации высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ) является комплексной категорией, включающей в качестве компоненты их параметрическую надежность [1, 2], которая отражает свойство формировать испытательные импульсы с требуемыми параметрами. В [3] показано, что рассмотрение вопросов параметрической надежности является высшим уровнем иерархической структуры синтеза разрядных цепей ВИИУ. Основные положения расчета параметрической надежности ВИИУ рассмотрены в [4], где показано, что расчет может быть проведен с использованием числовых характеристик распределения параметров испытательного импульса. Одним из параметров испытательных импульсов, существенно влияющим на работоспособность оборудования, является время нарастания значений импульсных воздействий. В [4] для разрядной  $RLC$ -цепи генератора импульсов тока (ГИТ) приведены соотношения, которые определяют числовых характеристик распределения

длительности нарастания значений импульса тока от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения (математического ожидания и дисперсии). При этом предполагалось, что значения времени нарастания

распределены нормально и  $R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \geq 60$ . Однако, указанное соотношение параметров разрядной цепи является только частью области возможных соотношений параметров, а нормальность распределения времени нарастания значений испытательного импульса тока не всегда очевидна.

Учитывая ограниченность имеющихся результатов, представляется целесообразным продолжение исследований в данном направлении.

**Целью** настоящей работы является вывод соотношений для определения величин, характеризующих распределение значений времени нарастания и оценки вероятности безотказной работы испытательного устройства.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из материалов, приведенных в [5] следует, что для схемы ГИТ, представляемой последовательной  $RLC$ -цепью, имеет место следующая зависимость для времени нарастания значений импульса тока:

$$T_{H(0,1;0,9)} = \sqrt{L \cdot C} \cdot f(r), \quad (1)$$

где  $T_{H(0,1;0,9)}$  – время нарастания значений импульса от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения

тока;  $r = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$  – безразмерный аналог сопротивления разрядной цепи;  $R, L, C$  – активное сопротивление, индуктивность и емкость разрядной цепи;  $f(r)$  – некоторая функция переменной  $r$ .

Можно показать, что для  $r > 0$  функция  $f(r)$  является монотонно убывающей функцией, которая всегда с заданной точностью представима в некотором интервале  $[r_{\min}, r_{\max}]$  степенной функцией вида:

$$f(r) = A \cdot r^B, \quad (2)$$

где коэффициенты функции имеют следующие огра-

ничения:  $A > 0, B < 0$ .

Тогда, подставляя выражение (2) в (1), получим:

$$T_{H(0,1;0,9)} = A \cdot R^B \cdot L^{0,5 \cdot (1-B)} \cdot C^{0,5 \cdot (1+B)}. \quad (3)$$

Применяя к (3) операции нахождения математического ожидания и дисперсии [6] в предположении независимости  $R, L$  и  $C$  параметров разрядной цепи и близости их распределения к нормальному распределению, можем получить следующие соотношения для вычисления числовых характеристик распределения времени нарастания импульса тока:

– математическое ожидание

$$M[T_{H(0,1;0,9)}] = A \cdot M[R]^B \cdot M[L]^{0,5 \cdot (1-B)} \times \\ \times M[C]^{0,5 \cdot (1+B)} \cdot \left\{ 1 + \frac{B \cdot (B-1)}{2} \cdot V[R]^2 - \right. \\ \left. - \frac{1-B^2}{8} \cdot V[L]^2 - \frac{1-B^2}{8} \cdot V[C]^2 \right\}; \quad (4)$$

– дисперсия

$$D[T_{H(0,1;0,9)}] = A^2 \cdot M[R]^{2 \cdot B} \cdot M[L]^{(1-B)} \times \\ \times M[C]^{(1+B)} \cdot \left\{ B^2 \cdot V[R]^2 + \frac{(1-B)^2}{4} \cdot V[L]^2 + \right. \\ \left. + \frac{(1+B)^2}{4} \cdot V[C]^2 + \frac{B^2 \cdot (B-1)^2}{4} \cdot V[R]^4 + \right. \\ \left. + \frac{(1-B^2)^2}{32} \cdot V[L]^4 + \frac{(1-B^2)^2}{32} \cdot V[C]^4 + \right. \\ \left. + \frac{B^2 \cdot (1-B)^2}{4} \cdot V[R]^2 \cdot V[L]^2 + \right. \\ \left. + \frac{B^2 \cdot (1+B)^2}{4} \cdot V[R]^2 \cdot V[C]^2 + \right. \\ \left. + \frac{(1-B^2)^2}{16} \cdot V[L]^2 \cdot V[C]^2 \right\}, \quad (5)$$

где  $V[x]^2 = \frac{D[x]}{M[x]^2}$  – квадрат коэффициента вариации случайной переменной  $x$ .

В нормативных документах, регламентирующих испытания технических объектов (например [7]) время нарастания задается номинальным значением и допускаемыми отклонениями  $T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} \pm \Delta T$ . ГИТ считается работоспособным устройством по параметру  $T_{H(0,1;0,9)}$ , если формируемый импульс имеет время нарастания, которое находится в интервале  $[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T, T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T]$ . Оценить вероятность нахождения ГИТ в работоспособном состоянии можно с использованием числовых характеристик распределения времени нарастания, вычисляемых по (4) и (5) [4].

При выводе соотношений (4) и (5) предполагалось, что распределение значений  $R, L$  и  $C$  параметров разрядной цепи описывается нормальным законом. Однако, как в начале, так и особенно при длительной эксплуатации ГИТ может иметь место отклонение закона распределения параметров разрядной цепи от

нормального [2]. Таким образом, возникает проблема допустимости использования соотношений (4) и (5) при распределении значений  $R, L$  и  $C$  параметров разрядной цепи по закону, отличному от нормального закона. Для проверки допустимости использования (4) и (5) было проведено имитационное моделирование распределения  $T_{H(0,1;0,9)}$  и определены числовые характеристики распределения времени нарастания при равномерном распределении значений  $R, L$  и  $C$  параметров разрядной цепи. Выбор вида распределения определился его существенным отклонением от нормального распределения.

Можно показать, что для интервала  $2 \leq r \leq 30$  при коэффициентах  $A = 1,06; B = -0,77$  погрешность вычислений по (3) не превышает 10%.

При имитационном моделировании допустимые относительные отклонения  $R, L$  и  $C$  параметров –  $\delta R, \delta L$  и  $\delta C$  изменялись от 0 до 0,2. Соответственно интервалы равномерного распределения параметров составляли:  $[R_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta R), R_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta R)], [L_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta L), L_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta L)], [C_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta C), C_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta C)]$ , где  $R_{\text{ном}}, L_{\text{ном}}, C_{\text{ном}}$  – номинальные значения параметров разрядной цепи.

Как показали результаты обработки данных имитационного моделирования, при доверительной вероятности 0,9 [6] математическое ожидание времени нарастания практически не отличается от рассчитанного по формуле (4), а дисперсия отличается от рассчитанной по формуле (5) не более чем на 5%, что приемлемо для технических расчетов.

Таким образом, соотношения (4) и (5) применимы для определения математического ожидания и дисперсии времени нарастания импульса тока при распределении параметров разрядной цепи существенно отличном от нормального распределения.

Для оценки вероятности нахождения ГИТ в работоспособном состоянии значимым является вид распределения времени нарастания. При известной функции распределения вероятность безотказной работы определяется как вероятность попадания времени нарастания в интервал  $[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T, T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T]$  и рассчитывается по выражению

$$P_{\text{бр}} = F(T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T) - F(T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T), \quad (6)$$

где  $F(\bullet)$  – функция распределения времени нарастания.

В частности, при нормальном законе распределения времени нарастания значений испытательного импульса тока, вероятность безотказной работы определяется достаточно просто с использованием математического ожидания и дисперсии по формуле [6]:

$$P_{\text{бр}} = N \left\{ \frac{[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T] - M[T_{H(0,1;0,9)}]}{\sqrt{2 \cdot D[T_{H(0,1;0,9)}]}} \right\} - \\ - N \left\{ \frac{[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T] - M[T_{H(0,1;0,9)}]}{\sqrt{2 \cdot D[T_{H(0,1;0,9)}]}} \right\}, \quad (7)$$

где  $N(\bullet)$  – функция нормального распределения.

Если закон распределения времени нарастания неизвестен, то для расчета вероятности безотказной

работы целесообразно воспользоваться оценкой, основанной на неравенстве Чебышева [4]

$$P_{\text{бр}} \geq 1 - \frac{D[T_{\text{H}(0,1;0,9)}]}{2} \times \left\{ \frac{1}{\left( [T_{\text{H}(0,1;0,9)}]_{\text{ном}} + \Delta T \right) - M[T_{\text{H}(0,1;0,9)}]} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{\left( [T_{\text{H}(0,1;0,9)}]_{\text{ном}} - \Delta T \right) - M[T_{\text{H}(0,1;0,9)}]} \right\}^2 \right\}. \quad (8)$$

Данные имитационного моделирования показывают, что при равномерном распределении параметров цепи распределение времени нарастания отличается от нормального (рис. 1).

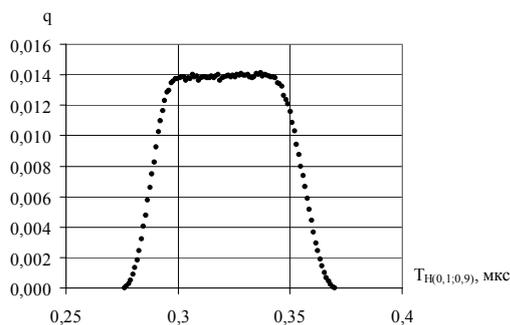


Рис. 1. Характерный график плотности распределения времени нарастания значений импульса.

$$R = 20 \text{ Ом}, L = 3,5 \text{ мкГн}, C = 0,9 \text{ мкФ}, \delta R = 0,02, \delta L = 0,12, \delta C = 0,22$$

При этом оценка вероятности безотказной работы, производимая по соотношению (8) дает сильно заниженное значение. Например, для данных моделирования, представленных на рис. 1 при  $\delta(T_{\text{H}(0,1;0,9)}) = 0,07$  оценка по (8) дает значение вероятности безотказной работы  $P_{\text{бр}} \geq 0,17$ ; по результатам имитационного моделирования  $P_{\text{бр}} = 0,666$ . Формальная оценка по (7) дает завышенное, но более близкое значение  $P_{\text{бр}} = 0,728$ . Такое соотношение между значениями оценок позволяет предположить возможность использования соотношения (7) для оценки вероятности безотказной работы и при неизвестном законе распределения времени нарастания.

Как показали проведенные расчеты, при изменении относительного отклонения параметров цепи  $\delta R$ ,  $\delta L$ , и  $\delta C$  в интервале [0 до 0,2], и допуском относительном отклонении времени нарастания  $\delta(T_{\text{H}(0,1;0,9)}) > 0,125$  для оценки вероятности безотказной работы можно воспользоваться соотношением (7). При этом погрешность определения вероятности безотказной работы с доверительной вероятностью 0,9 не превышает 10%. Учитывая, что допускаемые отклонения времени нарастания в нормативных документах задаются в пределах 0,1 – 0,3 от номинального значения, использование выражения (7) для расчетов можно считать приемлемым.

## ВЫВОДЫ

1. Выведены аналитические соотношения для определения математического ожидания и дисперсии времени нарастания значений испытательного импульса тока. Показано, что данные соотношения могут быть использованы при распределении значений параметров элементов схемы резко отличных от нормального распределения.

2. Приведены соотношения, позволяющие определять вероятность безотказной работы генератора импульсов тока по параметру – время нарастания импульса.

Материалы статьи могут быть использованы для исследования статистических характеристик других параметров, характеризующих испытательный импульс тока.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Надежность технических систем / Е.С. Переверзев, А.П. Алпатов, Ю.Ф. Даниев, П. Новак. — Д.: Пороги, 2002. — 397 с.
- [2] Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.13. — Харьков, 2004. — 205 с.
- [3] Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств // Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков). — Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. — С. 224 – 226.
- [4] Петков А.А. Расчет параметрической надежности генератора импульсов тока // Электротехника. — 1993. - №5. — С. 69 – 71.
- [5] Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. — С. 65 - 69.
- [6] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высш.шк., 2002. - 575 с.
- [7] ГОСТ Р 50932-96 Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1996. — 15 с.

Поступила 26.06.2008