УДК 621.313:47.05.15

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ИЗМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Герасименко А.В.
Научный руководитель – доцент Силин Н.В.

Дальневосточный государственный технический университет

Частичные разряды (ЧР) в изоляции возникают в местах с повышенной напряженностью электрического поля или с пониженной электрической прочностью. Как правило, ЧР представляют собой пробои газовых включений или локальные пробои в прослойках пропитывающей жидкости. Условия возникновения и развития ЧР определяются конфигурацией электрического поля и его электрофизическими параметрами.

На практике процедура анализа обычно сводится к определению следующих характеристик: кажущегося заряда, величины среднего тока и количества ЧР.

Если к испытуемому объекту приложено переменное синусоидальное напряжение, то включение находится под воздействием синусоидального электрического поля $e(t) = \mathrm{E_m} \sin \omega t$

При воздействии на испытуемый объект синусоидальным электрическим полем в течение первого полупериода ЧР возникают тогда, когда напряженность поля достигает значения напряженности зажигания $\mathrm{E_з}$. При возникновении ЧР напряженность на включении падает до значения напряженности погасания $\mathrm{E_п}$, при котором разряд гаснет.

Для удобства анализа рассмотрим процесс возникновения ЧР в течение одного полупериода колебаний $e_в(t)$, при $-\mathrm{T}/4 \le t \le \mathrm{T}/4$.

Введем обозначения: $u(t) = e(t)/\mathrm{E_m} = \sin \omega t$, $\mathrm{E_з}/\mathrm{E_m} = v$, $(\mathrm{E_з} - \mathrm{E_п})/\mathrm{E_m} = d$, $\sin \omega t = x$.

При отсутствии ЧР величина $u(t)$, представляет собой относительное значение напряженности на включении, причем данная величина синусоидальна.

Считая, что $x = \sin \omega t$, получим $u(t) = x$, откуда $t = \dfrac{1}{\omega} \arcsin x$. На отрезке $-\mathrm{T}/4 \le t \le \mathrm{T}/4$ величина $u(t) = x$ изменяется в пределах $-1 \le x \le 1$.

Проанализируем характер изменения функции $u(t) = x$ при наличии ЧР. Предположим, что в момент $t = -\dfrac{\mathrm{T}}{4}$, что соответствует $x = -1$ значение напряженности электрического поля равно $-\mathrm{E_0}$, которое определяется величиной остаточного заряда на включении после предыдущей серии ЧР.

Представим величину $-\mathrm{E_0}$ в относительных единицах, обозначив $e_0 = \mathrm{E_0}/\mathrm{E_m}$.

Рассмотрим процесс изменения $u(t)$ в интервале $-\mathrm{T}/4 \le t \le t_1$, где t_1 – момент возникновения первого ЧР. Приведенный интервал времени соответствует интервалу $-1 \le x \le x_1$, где x_1 – соответствует моменту $t_1 = \dfrac{1}{\omega} \arcsin x_1$.

На данном отрезке $u(x)$ можно приближенно представить виде прямолинейной зависимости $u(x) = x + u_0$

При $x = -1$ $u(-1) = -e_0$, следовательно $-e_0 = -1 + u_0$, откуда получим $u_0 = 1 - e_0$.

Таким образом, на отрезке $-1 \le x \le x_1$ функцию $u(x)$ можно представить в виде:

$$u(x) = 1 - e_0 + x \qquad (1)$$

В момент x_1 начинают возникать ЧР, очередная серия которых занимает интервал $x_1 \le x \le 1$. Предположим, что время разряда ЧР значительно меньше времени нарастания напряженности поля до значения $\mathrm{E_з}$. В этом случае временем разряда можно пренебречь и считать, что $u(x)$ мгновенно уменьшается по закону

$$u(x) = 1 - e_0 - d + x\,. \qquad (2)$$

Если за интервал $x_1 \le x \le 1$ происходит n ЧР, то функция $u(x)$ совершит n скачков и будет равна $u(x) = 1 - e_0 - nd + x$.

При $x = 1$ $u(1) = e_0$, следовательно $u(1) = 1 - e_0 - nd + 1 = e_0$, отсюда получим

$$e_0 = 1 - \frac{nd}{2}\,. \qquad (3)$$

Подставляя (3) в (1) получим выражение для $u(x)$ в интервале $-1 \le x \le x_1$:

$$u(x) = x + \frac{nd}{2}\,. \qquad (4)$$

Подставляя (3) в (2) получим выражение для $u(x)$ в интервале $x_1 \le x \le 1$:

$$u(x) = x + \frac{nd}{2} - d\,. \qquad (5)$$

Значение $\mathrm{E_0}$ всегда располагается в интервале между $\mathrm{E_з}$ и $\mathrm{E_п}$, то есть $e_0 \ge \frac{\mathrm{E_з} - (\mathrm{E_з} - \mathrm{E_п})}{\mathrm{E_m}} = \frac{\mathrm{E_з}}{\mathrm{E_m}} - \frac{(\mathrm{E_з} - \mathrm{E_п})}{\mathrm{E_m}} = v - d$, откуда $e_0 \ge v - d$.С другой стороны $\mathrm{E}(\mathrm{T}/4) = \mathrm{E_0} < \mathrm{E_з}$, то есть $\frac{\mathrm{E_0}}{\mathrm{E_m}} < \frac{\mathrm{E_з}}{\mathrm{E_m}}$ или $e_0 < \mathrm{v}$. В результате получим систему неравенств

$$\begin{cases} 1 - \dfrac{nd}{2} \ge v - d, \\ 1 - \dfrac{nd}{2} < v. \end{cases}$$

Выполняя преобразование получим

$$\begin{cases} n \le \dfrac{2 \cdot (1 - v)}{d} + 2, \\ n > \dfrac{2 \cdot (1 - v)}{d}. \end{cases} \qquad (6)$$

На интервале $\frac{2 \cdot (1 - v)}{d} < n \le \frac{2 \cdot (1 - v)}{d} + 2$ есть только два целых значения, являющихся решением (6) $n_1 = n_0 + 1$, $n_2 = n_0 + 2$, где n_0 – целая часть величины $\frac{2 \cdot (1 - v)}{d}$, причем $n_0 \le v$, а $n_0 + 1 > v$.

Полученные результаты позволяют предположить, что при одних и тех же значениях $\mathrm{E_m}, \mathrm{E_з}, \mathrm{E_п}$ во включении могут существовать две серии ЧР с количеством разрядов, отличающихся на единицу. Обе серии ЧР с одинаковой вероятностью могут возникать в однотипных включениях, причем суммарные мощности будут примерно одинаковы.

Далее определим моменты возникновения и окончания серии ЧР. Условием возникновения является достижение напряженностью поля значения $\mathrm{E_з}$ в момент времени x_1, что соответствует $u(x_1) = v$. Подставив в (4) $x = x_1$, получим $u(x_1) = x_1 + \frac{nd}{2} = v$, откуда $x_1 = -\frac{nd}{2} + v$.

Пусть $x = x_2$ - момент возникновения второго ЧР, на интервале $x_1 \le x \le x_2$ функция описывается выражением (5). Поскольку в момент x_2 $u(x_2) = v$, то $u(x_2) = \frac{nd}{2} - d + x_2 = v$, откуда получим $x_2 = -\frac{nd}{2} + d + \mathrm{v}$.

Момент возникновения произвольного *k*-ого ЧР определяется из отношения $x_k = -\frac{nd}{2} + (k-1)d + v$. Интервал между соседними разрядами серии на оси $x = \sin \omega t$ равен $x_1 - x_2 = -\frac{nd}{2} + d + v + \frac{nd}{2} + 2d + v = d$.

ВЫВОДЫ

1. Одному набору значений $\mathrm{E_m}$, $\mathrm{E_з}$, $\mathrm{E_п}$ соответствуют 2 типа серий ЧР с числом разрядов $n_1 = n_0 + 1$ и $n_2 = n_0 + 2$, где n_0 – целая часть величины $\frac{2 \cdot (1 - v)}{d}$, $v = E_з / E_m$, $d = (\mathrm{E_з} - \mathrm{E_п}) / \mathrm{E_m}$. Оба типа серий равновероятны. При большом количестве неоднородностей наблюдаются оба типа серий, при этом их суммарные мощности примерно равны.
2. На интервале времени $-\mathrm{T}/4 \le t \le \mathrm{T}/4$ при изменении синусоидальной составляющей напряженности электрического поля по закону $e(t) = \mathrm{E_m} \sin \omega t$ разряды возникают в моменты времени $t_k = \frac{1}{\omega} \arcsin x_k$, где $x_k = -\frac{nd}{2} + (k-1)d + v$, *k*=1,2…*n*.
3. Интервал между соседними разрядами серии на оси $x = \sin \omega t$ равен $d = (\mathrm{E_з} - \mathrm{E_п}) / \mathrm{E_m}$.