

УДК 621.3

**Измерение напряжения с использованием делителей**

Вашков В. В., Саковец П. Д., Зубрицкий Н. В.

Научный руководитель – ГАВРИЕЛОК Ю. В.

Делитель напряжения – это измерительное устройство, представляющее из себя цепочку последовательно соединенных элементов, имеющих активное или реактивное сопротивление, один конец которой заземляется, а на другой конец подается измеряемое напряжение. Делитель напряжения содержит низковольтное плечо, к которому присоединяется измерительный прибор, и высоковольтное плечо. Это отношение полного сопротивления делителя к сопротивлению низковольтного плеча делителя:

$$K_{\text{д}} = \frac{(Z_1 + Z_2)}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Делитель должен удовлетворять основному требованию: напряжение на низковольтном плече должно по форме повторять измеряемое напряжение, приложенное к высоковольтному плечу. Для этого необходимо, чтобы:

- коэффициент деления не зависел от частоты;
- коэффициент деления не зависел от величины и полярности измеряемого напряжения;
- величина сопротивления делителя не зависела от напряжения, температуры и включение делителя не оказывало влияния на измеряемое напряжение.

Делители напряжения используются для измерения постоянных, переменных и импульсных напряжений. Однако из-за существенного различия в требованиях к делителям при напряжениях различного вида обычно делители изготавливают для измерения какого-либо одного вида напряжения. При создании делителей на высокие классы напряжений (порядка  $10^6$  и более) такой подход оказывается неэкономичным. Поэтому в настоящее время изготавливаются «универсальные» делители:

- омические;
- емкостные;
- емкостно-омические.

Наиболее полная эквивалентная схема делителя напряжения, состоящая из  $N$  одинаковых элементов (рисунок 1), может рассматриваться как длинная линия, заземленная с одного конца. Из такой схемы замещения как частный случай можно получить любые схемы замещения делителей – омического, емкостного, емкостно-омического.

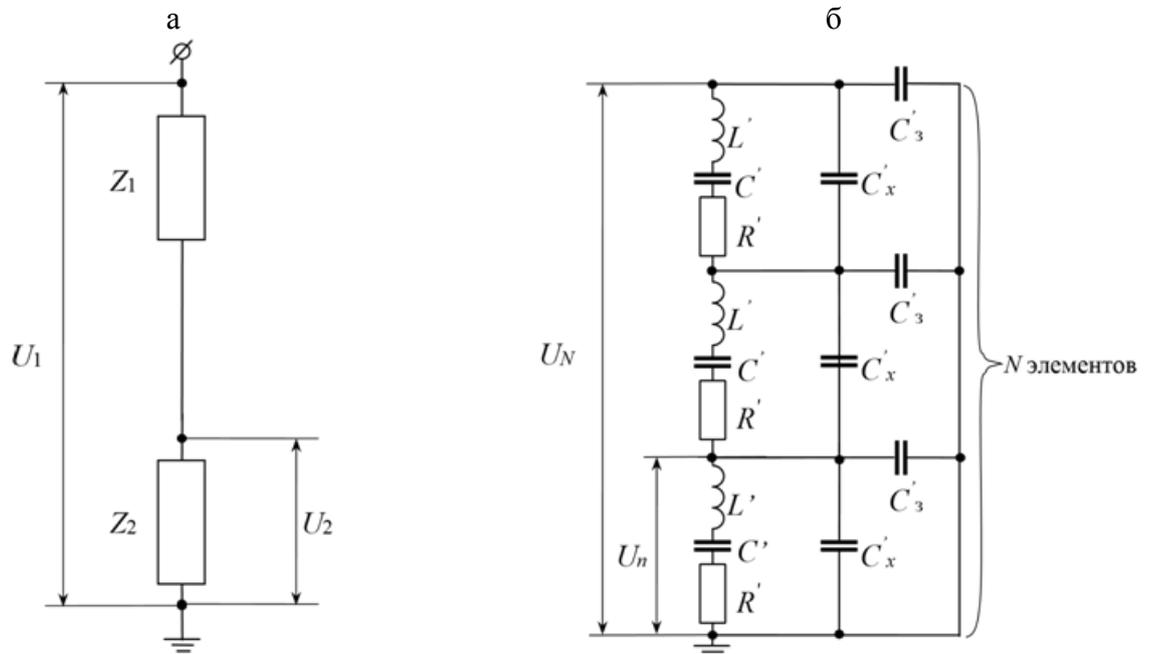
Продольная емкость делителя  $C$  зависит от конструкции делителя и для омических делителей составляет единицы пФ. Паразитную емкость делителя на землю  $C_3$  без учета влияния окружающих объектов можно рассчитать как:

$$C_3 = \frac{4\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{h(h+4a)}{r(3h+4a)}},$$

где  $h$  – высота делителя;  $a$  – расстояние от основания высоковольтного элемента (резистора) делителя до поверхности земли;  $r$  – радиус делителя.

Паразитная емкость на землю  $C_3$  приводит к неравномерному распределению напряжения вдоль его длины из-за токов, утекающих на землю. Это приводит к изменению коэффициента деления. Для уменьшения влияния паразитной емкости на землю делители снабжают экранами (колоколообразными, тороидальными или экранами по всей длине – цилиндрическими). Экраны подсоединяются к высоковольтному концу делителя, а цилиндрический экран соединяется и с землей.

Способность делителя верно передавать измеряемый импульс характеризуется коэффициентом передачи (частотная характеристика). Это отношение комплексной амплитуды выходного напряжения к комплексной амплитуде входного напряжения. Расчет характеристик передачи напряжения весьма громоздок в силу сложных схем замещения делителей. Поэтому на практике экспериментально определяют при подаче на вход делителя прямоугольного импульса. По сигналу на выходе можно определить переходную функцию (время реакции) измерительной системы по методике, изложенной в ГОСТ 17512-82.



- $R'$  – активное сопротивление элемента делителя;
- $L'$  – индуктивность элемента делителя;
- $C'_x$  – емкость элемента делителя на землю;
- $C$  – продольная емкость элемента делителя;

$C'_x$  – включенная емкость последовательно с элементом делителя

Рисунок 1 – Принципиальная схема делителя напряжения (а) и его схема замещения (б)

**Емкостный делитель.**

Схему емкостного делителя можно получить, полагая в общей схеме  $L'=0$ ,  $R'=0$ ,  $C'=0$  (рисунок 1). Переходная функция такого делителя имеет вид:

$$g = n / N(1 - C_c / 6C_x).$$

Как видно из этого выражения, емкостный делитель воспроизводит процесс с постоянной погрешностью, не зависящей от частоты. Идеальная передаточная характеристика будет при максимально большом отношении  $C_x / C_c$ . В практике создания таких делителей достаточно иметь соотношение  $C_x / C_c > 3-5$ , так как при больших значениях делитель будет представлять большую емкостную нагрузку и влиять на измеряемое напряжение (амплитуду и форму сигнала).

С ростом частоты при достаточно большом отношении  $C_x / C_c$  распределение напряжения будет определяться токами через емкостную проводимость. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения чисто емкостного делителя для измерения быстроизменяющегося напряжения.

Однако реальные емкостные делители, собранные из конденсаторов, всегда обладают сопротивлением утечки, которое не позволяет использовать такие делители для измерения медленно меняющихся или постоянных напряжений, так как в этом случае распределение напряжения будет не по емкостям, а по сопротивлениям утечки. Кроме того, наличие собственной индуктивности конденсаторов ( $L \neq 0$ ) вызывает возникновение колебаний в делителе, что ограничивает применение их применение.

#### **Омический делитель для измерения постоянных напряжений.**

При измерении постоянных напряжений нет смысла рассматривать частотные характеристики делителя. Схема замещения в этом случае состоит из активного сопротивления элементов делителя и сопротивления утечки элементов на землю. Погрешность измерения напряжения омическим делителем в этом случае будет определяться качеством резисторов: температурной зависимостью их сопротивления; влиянием токов утечки по изоляционной конструкции и их нелинейной зависимостью от напряжения, а также влиянием коронного разряда.

Следовательно, для измерения с малой погрешностью делитель должен быть некоронирующим, сопротивление его должно быть на несколько порядков меньше сопротивления утечки. С другой стороны, сопротивление делителя должно быть не очень малым, чтобы ограничить ток через делитель, отбираемую им мощность и тем самым уменьшить температуру элементов делителя и влияние его на измеряемое напряжение. Конструкция делителя должна обеспечивать достаточную интенсивность отвода тепла, выделяющегося на токопроводящих элементах его.

При создании делителей для измерения постоянных напряжений используют проволочные или керамические резисторы. Проволочные сопротивления изготавливаются из манганина, константана, нихрома и других металлов с высоким удельным сопротивлением или используют выпускаемые промышленностью проволочные резисторы марок С5-23–С5-25 и ряд других. В качестве сопротивлений могут использоваться керамические объемные (ТВО) и с пленочным проводящим покрытием резисторы КЭВ.

#### **Омический делитель для измерения переменного и импульсного напряжения.**

Схема замещения таких делителей может быть получена, если в общей схеме замещения полагать  $C_x \rightarrow \infty$ . Для изготовления могут быть использованы проволочные сопротивления и керамические резисторы. Проволочные сопротивления обладают существенной индуктивностью. Снижение индуктивности в этом случае можно добиться, выполняя бифилярную намотку сопротивлений.

На характер передачи напряжения решающее влияние оказывают паразитная емкость на землю  $C_\zeta$  и индуктивность  $L$ , определяемые конструкцией делителя. Индуктивность делителя является нежелательным, но неизбежным параметром, присущим любому делителю. Величина ее зависит от конструктивного исполнения делителя, пропорциональна его длине, имеет порядок ( $10^{-6}$ – $10^{-5}$ ) Гн/м. Наличие паразитных параметров приводит к колебательным процессам в делителе. Для устранения возникающих колебаний необходимо их демпфирование.

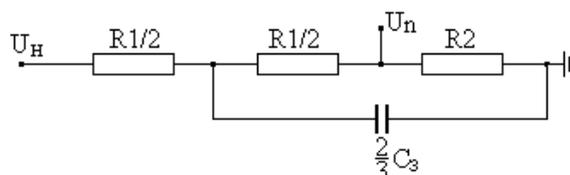
При измерении синусоидального напряжения из-за наличия паразитной емкости и индуктивности делителя возникают погрешности, которые определяются в основном произведением  $RC_\zeta$ . Выделяют амплитудную  $\delta U$  и угловую  $\varphi_U$  погрешности, которые при синусоидальном напряжении могут быть выражены как:

$$\begin{aligned}\delta U &= -0.3(\omega\tau_\zeta)^2, \\ \varphi_U &= \arctg(\omega\tau_\zeta),\end{aligned}$$

$$\tau_c = RC_c.$$

Применение делителей малого сопротивления и малого габарита позволяет уменьшить погрешности. Но низкоомный делитель на высокие напряжения выполнить затруднительно. Обычно такие делители изготавливаются на напряжение до 100 кВ.

При измерении импульсного напряжения омическим делителем возникают еще более сложные проблемы, связанные с высокими скоростями изменения напряжения. Переходная функция омического неэкранированного делителя, представлена упрощенной схемой замещения (рисунок 2).



$R_1$  и  $R_2$  – сопротивления высоковольтного и низковольтного плеча делителя

Рисунок 2 – Упрощенная схема замещения омического делителя

### Литература

1. Электронная библиотека студента [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://studentlib.com>. – Дата доступа : 18.11.2018.
2. Свободная энциклопедия «Википедия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org>. – Дата доступа : 18.11.2018.