

## 9. ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО СХЕМЕ АРКАДЬЕВА – МАРКСА

**Цель работы:** ознакомиться со схемой, устройством и работой генератора импульсных напряжений (ГИН), освоить методики определения и регулирования формы волны напряжения.

### 1. Краткие сведения

Изоляция электрооборудования на подстанциях подвергается воздействию грозовых и коммутационных перенапряжений. Для имитации грозовых воздействий, возникающих на изоляции подстанции, используют генераторы импульсных напряжений. Работа большинства устройств, предназначенных для получения высоковольтных импульсов напряжения, основана на принципе, который в литературе известен как принцип Аркадьева – Маркса.

### 2. Принцип работы схемы ГИН

Схема Аркадьева – Маркса использует группу конденсаторов, которые заряжаются параллельно, а разряжаются последовательно. Напряжение между началом и концом этой цепочки суммируется, достигая величины  $nU_0$ , где  $n$  – число последовательно включенных конденсаторов, а  $U_0$  – напряжение, до которого они были заряжены. Автоматическое и практически безынерционное переключение с параллельного соединения на последовательное соединение осуществляется искровыми промежутками. На рис. 1 приведен один из вариантов схемы генератора импульсных напряжений.

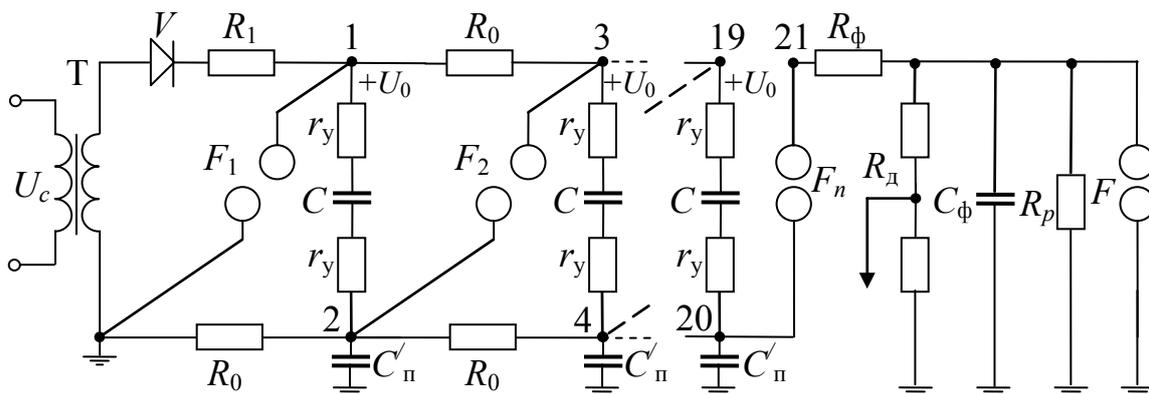


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема многоступенчатого генератора импульсных напряжений

Конденсаторы  $C$  заряжаются через большие сопротивления  $R_1$  (защитное) и  $R_0$  (зарядные). Причем  $R_1 \gg R_0$ , что обеспечивает практически одновременный заряд до определенного напряжения всех конденсаторов. К моменту окончания заряда конденсаторов потенциалы точек 0, 2, 4, 6 равны нулю, а потенциалы точек 1, 3, 5, 7 равны амплитуде напряжения  $(+U_0)$  источника  $T$ . Расстояния между шарами искровых промежутков  $F_1 \dots F_n$  устанавливаются таким образом, что напряжение  $U_0$  достаточно для пробоя только первого промежутка  $F_1$ . По мере зарядки конденсаторов потенциал точки 1 достигнет значения  $(+U_0)$ , и промежуток  $F_1$  пробивается.

Точка 2 принимает потенциал  $(-U_0)$ , т.к. паразитная емкость  $C'_п$  практически мгновенно заряжается через небольшое сопротивление (несколько Ом)  $r_y$ . Потенциал точки 3  $(+U_0)$  меняется сравнительно медленно, ибо точка 3 отделена от точки 1 сравнительно большим (десятки кОм) сопротивлением  $R_0$ . Таким образом, разность потенциалов между точками 2 и 3 после пробоя  $F_1$  составит примерно  $2U_0$ , что вызовет пробой промежутка  $F_2$ , после чего потенциал точки 4 относительно земли станет равным  $-2U_0$ , а разность потенциалов между точками 4 и 5 станет равна  $3U_0$  и вызовет пробой промежутка  $F_3$  и т.д. В результате последовательного пробоя промежутков  $F_1 \dots F_n$  все конденсаторы оказываются соединенными последовательно. Напряжения их суммируются, т.е. потенциал точки 21 станет равным  $U_2 = n(-U_0)$ , где  $n$  – число ступеней ГИН.

В работе ГИН осуществляется две стадии: стадия зарядки конденсаторов и стадия их разрядки. Соответственно этим стадиям можно выделить зарядную и разрядную схемы ГИН.

### 3. Форма испытательных волн

Величина разрядного напряжения при воздействии импульсного напряжения зависит от формы воздействующего на изоляцию напряжения.

Чтобы иметь возможность сравнивать между собой импульсные характеристики, полученные в различных лабораториях, форма волны для импульсных испытаний нормирована в соответствии с формой волн атмосферных перенапряжений, воздействующих на изоляцию.

Принимаемая для импульсных испытаний волна характеризуется быстрым нарастанием напряжения до максимума (фронт волны) и более медленным спадом (хвост волны). Поскольку по осциллограммам трудно определить начало волны, длительность фронта определяют так, как показано на рис. 2. Длительность волны определяется от

условного начала до момента, когда напряжение волны уменьшится вдвое по сравнению с амплитудой (рис. 2, а).

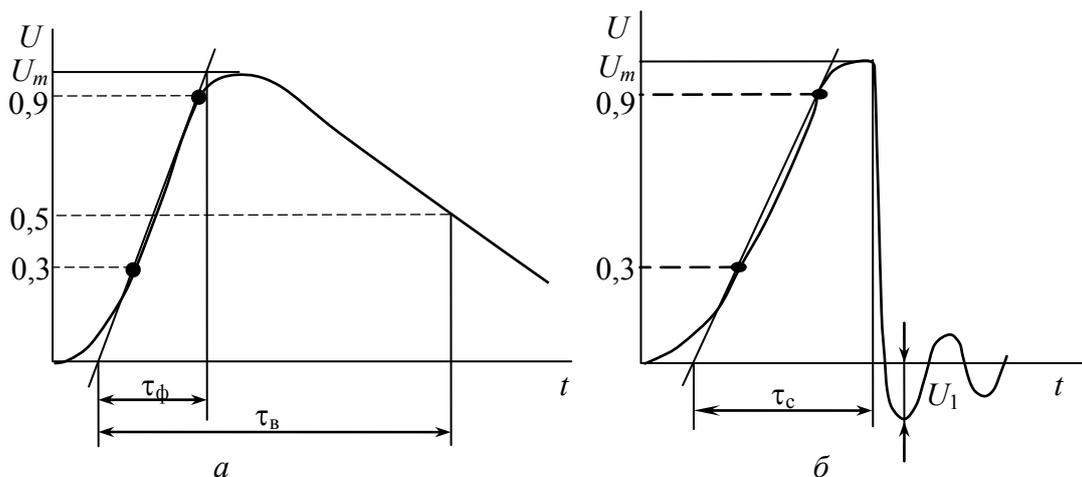


Рис. 2. Формы полной (а) и срезанной (б) стандартных волн импульсных напряжений

В качестве стандартной волны принята волна с параметрами:

$$\tau_\Phi = 1,2 \pm 0,4 \text{ мкс} \quad \text{и} \quad \tau_B = 50 \pm 10 \text{ мкс}$$

В процессе работы средств защиты от атмосферных перенапряжений, а также при пробое изоляционных промежутков вблизи шин подстанции на изоляции электрооборудования подстанции возможно появление так называемых срезанных волн, представляющих опасность для работы изоляции. Эта опасность связана с высокой скоростью изменения напряжения, приводящей к высоким градиентным перенапряжениям в обмотках трансформаторов, реакторов и электрических машин.

В связи с этим проводятся испытания такого оборудования стандартной срезанной волной, имеющей длительность порядка  $2,0 \pm 0,5$  мкс и представляющей собой начальную стадию полной стандартной волны (рис. 2, б).

#### 4. Регулирование формы волны

Необходимая форма волны напряжения достигается с помощью специальных формирующих элементов, включаемых в разрядную цепь ГИН. При отсутствии формирующих элементов и работе его на холостом ходу схема замещения разрядного контура и форма волны напряжения на выходе ГИН приведены на рис. 3, а:  $R_k$  – активное сопротивление разрядного контура;  $C_n$  – эквивалентная паразитная емкость разрядного контура;  $R_d$  – сопротивление делителя напряжения. Разрядная емкость генератора определяется как  $C_T = C/m$ , где  $C$  –

емкость одного конденсатора ступени,  $m$  – число последовательно соединенных конденсаторов разрядной цепи ГИН. Напряжение на выходе имеет аperiодическую форму с наложенными колебаниями, период этих колебаний определяется по формулам:

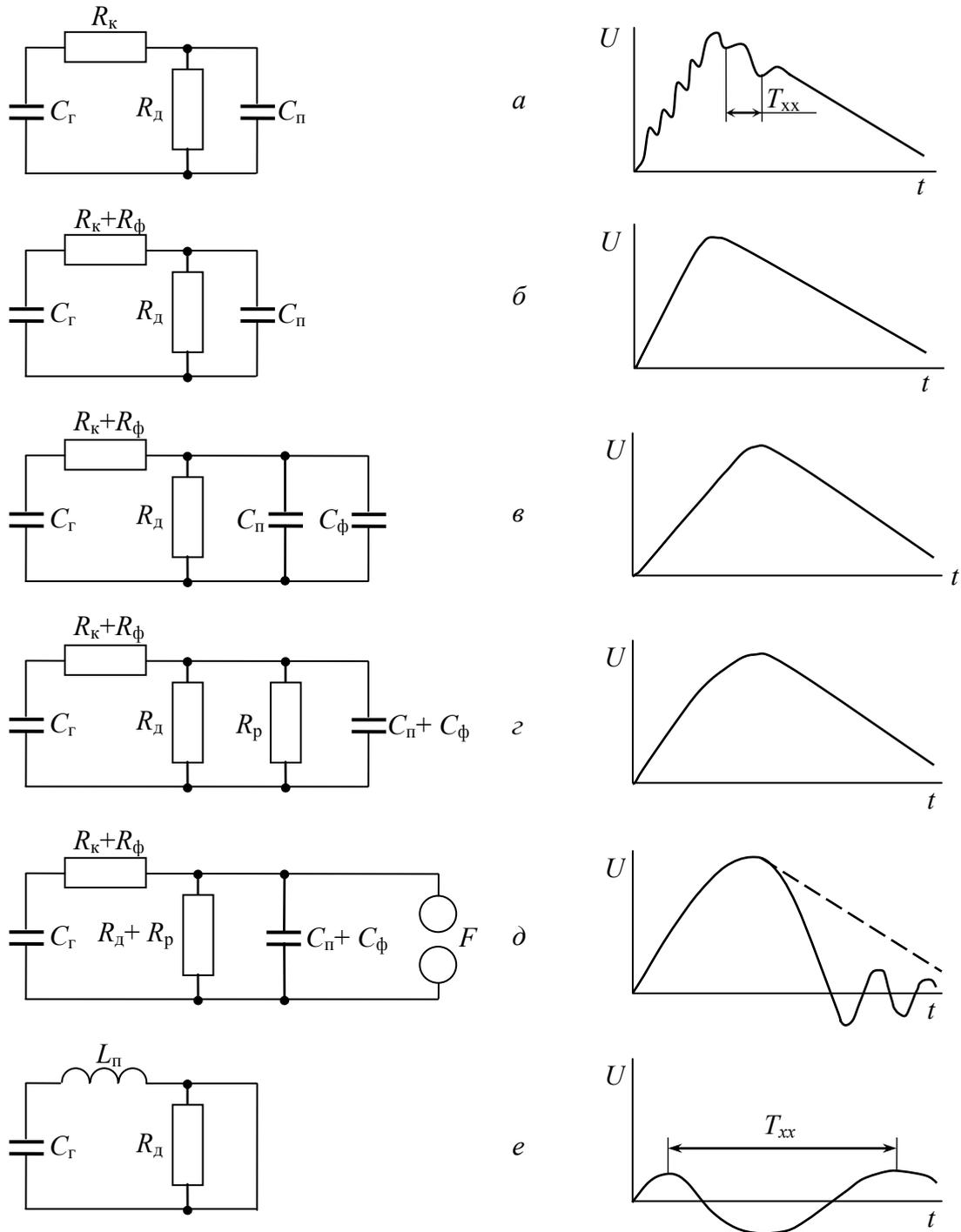


Рис. 3. Схемы замещения и соответствующие им стилизованные формы волн ГИН

$$T_{xx} \cong 2\pi\sqrt{L_{\Pi} \cdot C_{\Pi}}, \quad T_{кз} \cong 2\pi\sqrt{L_{\Pi} \cdot C_{Г}}, \quad (1)$$

где  $L_{\Pi}$  – эквивалентная индуктивность разрядного контура, которая может быть определена из опыта короткого замыкания.

Схема замещения и форма волны напряжения на индуктивности отрезка проводника, подключенного параллельно делителю –  $R_{д}$ , подобны показанным на рис. 3, е.

Для устранения колебаний на фронте волны (рис. 3, а), возникающих в контуре, образованном индуктивностью ступени  $L'_{\Pi}$  и паразитной емкостью  $C'_{\Pi}$ , шунтирующей зарядные сопротивления, в разрядный контур включают успокоительное сопротивление  $r_y$  (рис. 1), выбираемые из условия:

$$r_y \geq 2\sqrt{\frac{L'_{\Pi}}{C'_{\Pi}}}. \quad (2)$$

Эти сопротивления оказывают влияние и на длину фронта волны.

Для устранения колебаний с периодом  $T_{xx}$  и получения чисто апериодической волны в разрядный контур включают на выходе ГИН так называемое фронтовое сопротивление  $R_{\Phi}$  (рис. 1), выбираемое из условия:

$$R_{\Phi} \geq 2\sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}}. \quad (3)$$

Схема замещения и форма волны при включении  $r_k$  и  $R_{\Phi}$  подобны показанным на рис. 3, б.

Стремление получить стандартный фронт только за счет включения фронтового сопротивления требует весьма больших значений  $R_{\Phi}$ , что ведет к снижению амплитуды напряжения на выходе ГИН, поскольку напряжение импульса распределяется между  $R_{\Phi}$  и  $R_{д}$ . В связи с этим на выходе ГИН включают специальную емкость –  $C_{\Phi}$ .

В этом случае стандартный фронт можно получить при меньших значениях  $R_{\Phi}$ . Схема замещения и форма волны в этом случае подобны показанным на рис. 3, в. Таким образом, длительность фронта импульса в первом приближении может быть определена из выражения

$$\tau_{\Phi} \cong 3,25 \cdot R_{\Phi} (C_{\Pi} + C_{\Phi}) = 1,2 \cdot 10^{-6}. \quad (4)$$

Для регулирования длительности волны в разрядную схему параллельно делителю включают разрядное сопротивление –  $R_{р}$ . Схема замещения и форма волны подобны показанным на рис. 3, г. Длитель-

ность волны в первом приближении может быть определена из выражения

$$\tau_B \cong 0,7 \cdot C_{\Gamma} \left( \frac{R_d \cdot R_p}{R_d + R_p} \right) = 50 \cdot 10^{-6}. \quad (5)$$

В практической работе параллельно емкости и сопротивлениям ( $R_d$ ,  $R_p$  и  $C_{\Phi}$ ) включается емкость объекта  $C_x$  и сопротивление объекта  $R_x$ . Как правило, в большинстве случаев  $C_x \ll C_{\Phi}$ ,  $R_x \gg R_d$  и  $R_x \gg R_p$  и практически не оказывают влияния на форму волны напряжения на выходе ГИН. В общем случае форма волны напряжения определяется параметрами:  $C_{\Gamma}$ ,  $C_{\Pi}$ ,  $C_x$ ,  $L_{\Pi}$ ,  $R_x$ ,  $R_k$ ,  $R_d$ ,  $r_y$ ,  $R_p$ ,  $R_{\Phi}$ ,  $C_{\Phi}$ , причем последние четыре обычно называют формирующими элементами.

## 5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с особенностями охраны труда при работе с высоковольтным оборудованием, содержащим накопители энергии.
2. Ознакомиться со схемой, устройством и работой генератора импульсных напряжений. Записать величины  $C$ ,  $n$ ,  $R_d$ ,  $C_{\Phi}$ .
3. Собрать схему короткого замыкания и снять осциллограмму напряжения. Определить период колебаний  $T_{кз}$ .
4. Собрать схему холостого хода генератора и снять осциллограмму напряжения, определить период наложенных колебаний  $T_{хх}$ .
5. Проследить по осциллографу за изменением формы волны напряжения при включении формирующих элементов:  $R_{\Phi}$ ;  $R_{\Phi} + C_{\Phi}$ ;  $R_{\Phi} + C_{\Phi} + R_p$ .
6. Подключить шаровой разрядник и получить срезанную волну.

## 6. Содержание отчета

1. Привести принципиальную схему генератора импульсных напряжений и расшифровать все обозначения, приведенные на схеме. Пояснить принцип работы ГИН.
2. Привести формы стандартных испытательных волн и методику определения их параметров.
3. По полученным  $T_{кз}$  и  $T_{хх}$  определить  $L_{\Pi}$  и  $C_{\Pi}$ .
4. По полученным осциллограммам проанализировать влияние  $R_{\Phi}$ ,  $C_{\Phi}$  и  $R_p$  на форму волны.
5. Дать расчет  $R_{\Phi}$  и  $R_p$ , обеспечивающих стандартную форму волны при известных  $C_{\Phi}$ ,  $R_d$ ,  $C_{\Pi}$ ,  $C_{\Gamma}$ .

## 7. Контрольные вопросы

6. Почему для испытания изоляции используется стандартная форма волны напряжения?
7. Как регулируются:
  - а) длительность фронта импульса  $t_{\phi}$ ,
  - б) длительность волны  $t_{в}$ ,
  - в) амплитуда напряжения на выходе ГИН?
8. Почему изоляция трансформаторов, реакторов и вращающихся машин должна испытываться полной и срезанной волнами?
9. С помощью каких устройств в лабораториях получают срезанную волну, как можно регулировать время среза  $t_{ср}$ ?
10. Как изменить полярность выходного напряжения ГИН?
11. От чего зависит частота срабатывания ГИН?