

Особенности расчета и проектирования

универсальных импульсных генераторов для испытания варисторов

В статье рассматриваются особенности проектирования высоковольтных импульсных генераторов, предназначенных для испытания варисторов. Определены условия обеспечения режимов работы импульсных генераторов, близких к согласованным. Даны рекомендации по выбору оптимальных величин зарядных напряжений универсальных импульсных генераторов и приведено экспериментальное подтверждение этих рекомендаций.

**Виктор Опред, д. т. н.
Игорь Саенко, к. ф.-м. н.
Татьяна Синельщикова**

Saenko@magneton.ru

При серийном производстве варисторов, на основе которых изготавливаются «ограничители перенапряжений нелинейные» (ОПН), обязательным условием контроля качества изделий являются их импульсные испытания в соответствии со стандартом Международной электротехнической комиссии (МЭК) 99-4 [1]. Основные испытания, характеризующие варистор, — это испытания «грозовым» (8/20 мкс) импульсом; прямоугольным импульсом большой длительности (2 мс) или эквивалентными импульсами полусинусоидальной формы.

Величины остающихся напряжений варисторов при большой номенклатуре изделий могут изменяться от сотен вольт до нескольких киловольт, а величины токов — от сотен ампер до десятков тысяч ампер. Поэтому возникает потребность в универсальных генераторах импульсов, способных обеспечить испытания варисторов во всем диапазоне требуемых величин токов и остающихся напряжений, с учетом того, что нагрузка таких генераторов нелинейная.

Варисторы — это быстродействующие устройства, время переключения которых составляет доли микросекунд. В связи с этим можно рассматривать

варисторы как резистивную безынерционную нелинейную нагрузку.

Схема замещения варистора в режиме больших импульсных токов может быть представлена в виде источника противо-ЭДС U_0 , последовательно с которым включен резистор $R_{\text{диф}}$, где U_0 — остающееся напряжение варистора, а $R_{\text{диф}}$ — его дифференциальное сопротивление, определяющее угол наклона вольт-амперной характеристики (ВАХ) относительно оси абсцисс [2].

Величина $R_{\text{диф}}$ обычно составляет несколько миллиом и в большинстве случаев может не учитываться при анализе электромагнитных процессов в генераторах импульсов.

Для формирования в варисторах импульсов тока большой длительности прямоугольной формы широкое применение нашли генераторы на основе высоковольтных однородных искусственных линий (ОИЛ). В качестве коммутаторов в этих генераторах используются управляемые воздушные или вакуумные разрядники, игнитронные разрядники или тиристоры. При проектировании ОИЛ возникает проблема обеспечения согласованных режимов их работы.

В самом общем виде согласованный режим работы любого формирующего двухполюсника, в том числе и ОИЛ, определяется как $W_{\text{л}} = W_{\text{н}}$, где $W_{\text{л}}$ — энергия, запасенная в линии, а $W_{\text{н}}$ — энергия, выделенная в нагрузку за время длительности импульса t . Тогда условие согласования ОИЛ с линейными и нелинейными безынерционными резистивными нагрузками произвольного вида выглядит как

$$U_{\text{зар}} = 2U_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{н}}$ — напряжение на нагрузке.

Для длинной линии с распределенными параметрами (ДЛРП), эквивалентной ОИЛ, величина запасенной энергии равна

$$W_{\text{л}} = 0,5C_{\text{л}} \times U_{\text{зар}}^2$$

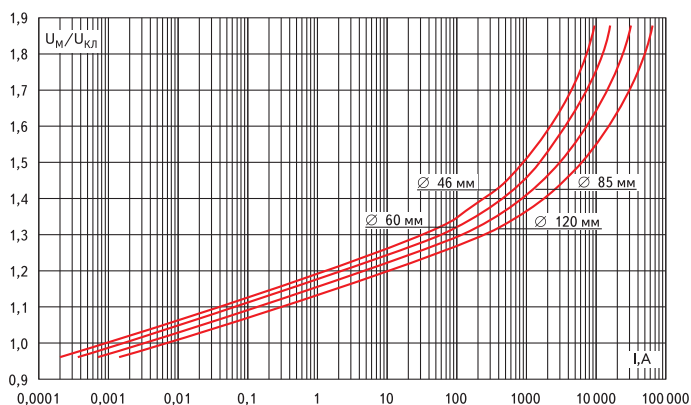


Рис. 1. ВАХ варисторов, производимых научно-производственной фирмой «Магнетон Варистор»

Величина энергии, выделенной в нагрузке, равна

$$W_n = U_n I_m \tau.$$

В этом случае ток нагрузки определяется разностью напряжений заряда линии и напряжения на нагрузке:

$$I_m = (U_{зар} - U_n) / \rho \quad (2)$$

Суммарная емкость ДЛРП [3]

$$C_n = \tau / 2\rho.$$

Энергия импульса тока любой формы, выделенная в нагрузке в виде противо-ЭДС, равна

$$W_n = U_n I_{cp} \tau,$$

где I_{cp} — среднее значение тока нагрузки за время длительности импульса τ .

Для прямоугольного импульса $I_{cp} = I_m$ условие согласования принимает вид

$$\frac{U_{зар}^2 \times \tau}{4\rho} = \frac{U_n \times \tau (U_{зар} - U_n)}{\rho},$$

отсюда

$$U_{зар}^2 = 4U_n \times (U_{зар} - U_n). \quad (3)$$

Решением уравнения (3) является равенство $U_{зар} = 2U_n$, что и определяет согласованный режим работы как ДЛРП, так и ОИЛ при любых линейных и нелинейных резистивных нагрузках.

Если испытания проводятся импульсами полусинусоидальной формы, то условие согласования имеет тот же вид, но при этом в качестве накопителя и формиратора используется последовательный LC-колебательный контур.

Для нагрузок в виде противо-ЭДС регулирование в широком диапазоне тока нагрузки при сохранении согласованного режима работы возможно только путем изменения величины волнового сопротивления формирующего двухполюсника, что трудно выполнимо на практике. В связи с этим параметры формирующих двухполюсников, работающих в составе импульсных испытательных стендов, однозначно могут быть определены только для варисторов одного типа. В этом случае параметры задаются либо требуемой величиной амплитуды тока импульса I_m , либо величиной энергии W_n , которая должна быть выделена в варисторе, исходя из прогнозируемой величины остающегося напряжения на варисторе U_0 .

Поскольку для прямоугольного импульса

$$W_n = U_0 I_m \tau,$$

то все расчеты сводятся к определению величины I_m .

Тогда $U_{зар} \approx 2U_0$, а волновое сопротивление ОИЛ

$$\rho = (U_{зар} - U_0) / I_m.$$

Суммарная емкость ОИЛ равна $C_n = \tau / 2, 2\rho$, а суммарная индуктивность — $L_n = \rho^2 C_n$. Для получения прямоугольных импульсов тока

с достаточно малыми длительностями фронта и среза применяются ОИЛ с числом ячеек n , равным 10–12. При этом величины элементов ячеек равны $L_{я} = L_n / n$ и $C_{я} = C_n / n$.

При отсутствии согласования ОИЛ находится либо в колебательном, либо в апериодическом режиме работы. При этом на отрезке времени $t > \tau$ к варистору и коммутатору будет приложено прямое или обратное остаточное напряжение $U_{ост}$.

При разряде ДЛРП на нагрузку можно рассматривать процесс разряда линии, заряженной до напряжения $U_{зар} = kU_0$, как эквивалентный процесс заряда линии от источника ЭДС.

$$E = U_{зар} - U_0 = U_0 (k - 1).$$

Напряжение заряда в момент времени $t = \tau$ равно:

$$U = -2E = 2U_0 (1 - k).$$

Поскольку начальный заряд линии был равен kU_0 , то остаточное напряжение равно:

$$U_{ост} = 2U_0 (1 - k) + kU_0 = U_0 (2 - k).$$

При значениях $k = 2$ режим разряда линии будет согласованным, $U_{ост} = 0$, и вся энергия, запасенная в линии, выделится в нагрузке за время $t = \tau$.

При значениях $k > 2$ режим будет колебательным, а к нагрузке и коммутатору по окончании основного импульса ($t \geq \tau$) будет приложено обратное напряжение $U_{обр} = U_0 (2 - k)$.

При значениях $k < 2$ режим будет апериодическим, а к нагрузке и коммутатору с момента времени $t \geq \tau$ будет приложено прямое напряжение $U_{пр} = U_0 (2 - k)$.

Силовые коммутаторы, применяемые в подобных установках, например воздушные разрядники, обычно не обладают вентильной проводимостью, а вентильные приборы (игнитронные разрядники) при коммутации больших токов плохо держат обратное напряжение. Использование тиристоров в импульсных высоковольтных установках не всегда целесообразно из-за сложности конструкции высоковольтного тиристорного ключа. Более предпочтительным представляется использование в качестве быстродействующего ключа непосредственно самого варистора, который обеспечивает практически полное отсутствие тока в нагрузке при $t \geq \tau$, если остаточное напряжение на формирующем двухполюснике меньше классификационного напряжения этого варистора.

Будем считать, что с момента времени $t \geq \tau$ коммутатор остается в проводящем состоянии и к варистору приложено остаточное напряжение линии. Для того чтобы энергия, выделяемая в варисторе с этого момента времени, была несущественна и не влияла на результаты процесса испытания, воспользуемся запирающими свойствами самого варистора, ограничив величину остаточного напряжения линии на уровне классификационного напряжения варистора, то есть

$$U_{ост} \leq U_{кл}. \quad (4)$$

Поскольку варистор обладает высоким быстродействием, классические проблемы обеспечения условий деионизации коммутаторов при этом не возникают, а токи варисторов при выполнении условия (4) не влияют на процесс испытаний.

Поэтому появляются возможность расширить допустимый диапазон регулировки напряжения заряда линии. Поскольку

$$\pm U_{ост} = \pm U_0 (2 - k) = \pm (2U_0 - U_{зар}) \leq U_{кл},$$

$$2U_0 - U_{кл} \leq U_{зар} \leq 2U_0 + U_{кл} \quad (5)$$

Остающееся напряжение варистора связано с классификационным напряжением как

$$U_0 = \beta \times U_{кл},$$

где β — коммутационный коэффициент, величина которого является практически постоянной для одной партии варисторов. Тогда из (5) получим

$$U_{кл} (2\beta - 1) \leq U_{зар} \leq U_{кл} (2\beta + 1). \quad (6)$$

Для согласованного режима $k = 2$. Приняв среднее значение $\beta = 1,5$ с учетом зависимости (6) и условия, что $U_{зар} = kU_0 = k\beta U_{кл}$, получим

$$2U_{кл} \leq U_{зар} \leq 4U_{кл}$$

или

$$1,33U_0 \leq U_{зар} \leq 2,66U_0, \quad (7)$$

то есть для колебательного режима $k_{max} = 2,66$, а для апериодического режима $k_{min} = 1,33$.

Подобный подход существенно расширяет возможность регулирования амплитуды тока нагрузки при неизменном волновом сопротивлении линии. При невыполнении условия (7) необходимо изменить волновое сопротивление линии, заложив возможность дискретного изменения ρ в установке еще на стадии ее проектирования.

При испытаниях варисторов необходимо стабилизировать либо ток варистора I_m , либо величину поглощаемой варистором энергии W_n . В одной партии варисторов допускаются отклонения классификационного и остающегося напряжения от номинального значения на $\pm 10\%$. В силу этого для стабилизации тока варисторов I_m необходимо каждый раз прогнозировать и устанавливать уровень напряжения заряда $U_{зар}$ для отдельно взятого образца по значению его классификационного напряжения. Это затрудняет автоматизацию процесса испытаний и осложняет работу оператора, а величина энергии, поглощаемой варисторами, не стабильна. Значительно проще стабилизировать не ток разряда, а уровень напряжения заряда ОИЛ с помощью простейших средств автоматизации. При этом в случае увеличенного значения величины остающегося напряжения отдельно взятого варистора его ток будет пропорционально меньше и наоборот. Поэтому следует ожидать существенного уменьшения влияния разброса величин остающихся напряжений на величину поглощаемой варисторами энергии.

Предлагается использовать следующий подход для определения требуемой величины напряжения заряда ОИЛ при испытании отдельной партии варисторов, классификационные напряжения которых предварительно измеряются в обязательном порядке.

Примем величину зарядного напряжения

$$U_{зар} = kU_{sp_0} = k\beta U_{кл} = const,$$

где $U_{кл}$ и U_{sp_0} — среднearифметические значения классификационных и остающихся напряжений варисторов отдельной партии.

Оценим влияние разброса величин остающихся напряжений варисторов на разброс величин поглощаемой ими энергии.

Энергия, поглощенная отдельным варистором, равна

$$W_n^{\Delta U} = (U_0^{cp} \pm \Delta U_0^{cp}) I_m \tau = [kU_0^{cp} - (U_0^{cp} \pm \Delta U_0^{cp})] \times \rho \times (U_0^{cp} \pm \Delta U_0^{cp}) \times \tau.$$

Поскольку τ и ρ — константы, то величина энергии, выделенной в нагрузке за один импульс, зависит как от коэффициента согласования, так и от разброса параметров варисторов, то есть $W_n = f(k, \Delta U_0^{cp})$.

В таблице приведены значения относительных величин энергии $W_n^* = W_n^{\Delta U} / W_n^{sp}$ для различных величин коэффициента согласования k при неизменной величине уровня зарядного напряжения $U_{зар}$, где $W_n^{\Delta U}$ — энергия, поглощенная варистором с величиной отклонения остающегося напряжения ΔU , W_n^{sp} — энергия, поглощенная варистором с нулевой величиной отклонения остающегося напряжения.

Из таблицы видно, что в согласованном режиме работы ($k = 2$) влияние разброса параметров варисторов минимально, в колебательном режиме ($2 \leq k \leq 2,66$) разброс параметров несущественно влияет на энергетику процесса, а в аperiodическом режиме ($1,33 \leq k \leq 2$) это влияние возрастает.

Отсюда следует, что более предпочтительны согласованный или колебательный режимы разряда. При этом появляется возможность автоматизировать процесс испытаний путем стабилизации напряжения заряда, поскольку отклонения величины поглощаемой варисторами энергии от заданной величины будут несущественны.

Приемлемое конструктивное решение, позволяющее дискретно регулировать волновое сопротивление линии, — это изготовление формирующего реактивного двухполюсника

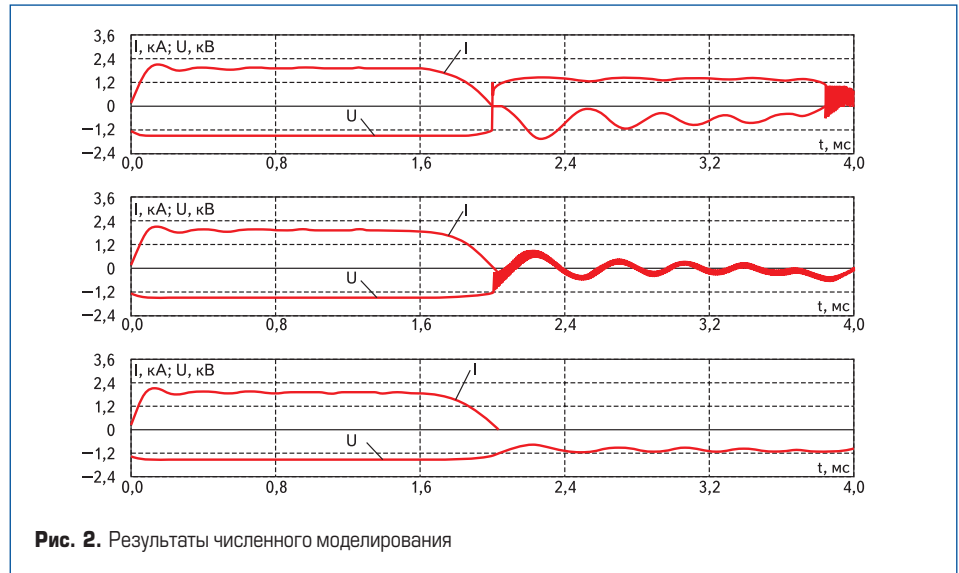


Рис. 2. Результаты численного моделирования

в виде нескольких ОИЛ, формирующих импульсы равных длительностей и имеющих либо равные волновые сопротивления, либо волновые сопротивления ρ_k , величины которых меняются по закону

$$\rho_k = \rho_0 2^{(k-1)} \quad (4).$$

При использовании различных вариантов последовательного и параллельного включения таких ОИЛ можно в широких пределах менять суммарное волновое сопротивление формирующего двухполюсника.

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования в Micro-Cap 7, демонстрирующие работу универсального испытательного стенда «Магнус». Стенд состоит из трех 12-звенных ОИЛ и обеспечивает возможность их параллельного или последовательного включения при неизменной величине тока нагрузки и различных суммарных волновых сопротивлениях линии.

На рис. 3–5 приведены результаты экспериментов при неизменной величине тока нагрузки и различных волновых сопротивлениях линии (сплошной линией показано остающееся напряжение варистора, а пунктирной — ток).

Экспериментально получено подтверждение как аналитических, так и численных расчетов, сделанных в данной работе. Особо следует отметить тот факт, что несогласованные режимы работы могут приводить к тепловому пробое испытываемых варисторов на отрезках времени, существенно превышающих длительность самого импульса. Это может быть объяснено наличием остающихся в формирующей линии напряжений, что существенно искажает результаты испытаний и поэтому требует особого внимания.

Литература

1. Международная электротехническая комиссия. (МЭК 99-4) Международный стандарт. Ограничители перенапряжений. Часть 4. Металлоокисидные ограничители перенапряжений без искровых промежутков для электрических сетей переменного тока. СПб., 1992.
2. Библиотека электронных компонентов. Выпуск 12: Варисторы и разрядники фирмы Siemens & Matsushita. М.: ДОДЭКА, 2000.
3. Иццоки Я. С. Импульсные устройства. М.: Советское радио, 1959.
4. Свидетельство на полезную модель № 25095. Высоковольтный стенд для испытания ограничителей перенапряжений / Саенко И. В., Опре В. М., Коротаев Н. В. // Бюллетень. 2002. № 25.

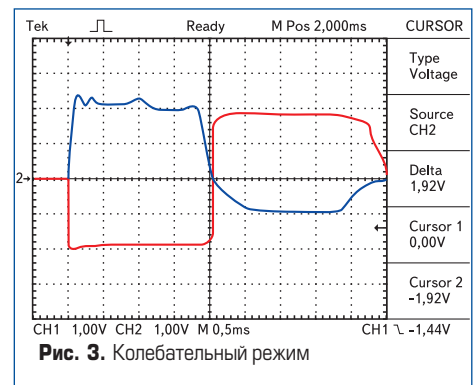


Рис. 3. Колебательный режим

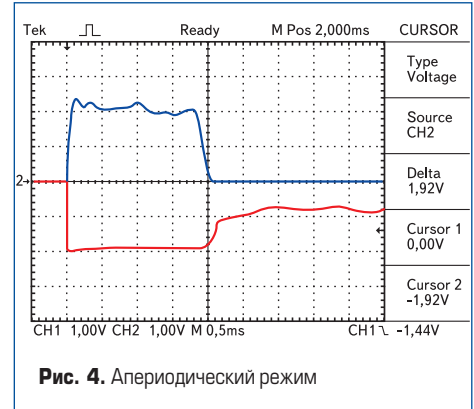


Рис. 4. Аperiodический режим

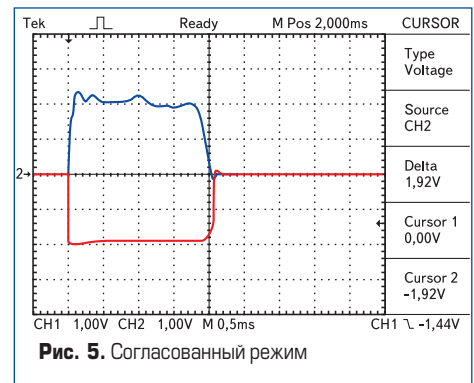


Рис. 5. Согласованный режим

Таблица

k	$\Delta U \neq 0, \%$	W_n^*
1,33	-10	1,173
1,33	0	1,0
1,33	+10	0,77
2,0	-10	0,99
2,0	0	1,0
2,0	+10	0,99
2,66	-10	0,954
2,66	0	1,0
2,66	+10	1,034