

Генерирование мощных импульсов тока

регулируемой длительности

Регулирование амплитуды импульсов тока нагрузки обычно производится за счет изменения уровня напряжения заряда формирующей цепи. Для нахождения оптимальных параметров импульсного процесса кроме этого требуется также регулировать длительность импульсов. Из трех канонических схем формирующих двухполюсников, нашедших применение на практике, приемлемыми для этого являются генераторы, выполненные на основе однородных искусственных линий, а также генераторы с частичным разрядом емкостного накопителя. В статье приводятся схемные решения и методики расчета мощных генераторов, обеспечивающих регулирование длительности прямоугольных импульсов тока нагрузки в диапазоне от десятков микросекунд до единиц миллисекунд. Амплитуды токов нагрузки при этом могут достигать десятков тысяч ампер, а уровни напряжений — десятков тысяч вольт.

Виктор Опред, д. т. н.

oprevm@yandex.ru

Необходимость регулирования длительности импульсов тока нагрузки обычно связана с поиском оптимальных режимов, определяемых частотой следования импульсов, их амплитудой и длительностью. Одним из наиболее простых решений, обеспечивающих регулирование длительности импульсов, является использование емкостного накопителя, работающего в режиме частичного разряда (рис. 1). Для коммутации тока нагрузки в таких генераторах используются мощные полностью управляемые ключи различных видов. В качестве таких ключей могут быть применены силовые транзисторы, модуляторные лампы или полностью управляемые ключи, выполненные на полупроводниковых приборах — тиратронах или тиристорах [1]. При подключении накопителя C_H к нагрузке начинается разряд, причем ток разряда $i_p(t)$ изменяется по экспоненциальному закону. Ключ K отключается в момент времени $t \leq t_{max}$, а $t_{max} \ll RC_H$, и в нагрузке возникает прямоугольный импульс, длительность фронта и среза которого в основном определяются параметрами ключа K , а величина спада плоской части тем меньше, чем больше значение C_H . Недостаток таких генераторов — это необходимость накопления в емкости C_H энергии, во много раз пре-

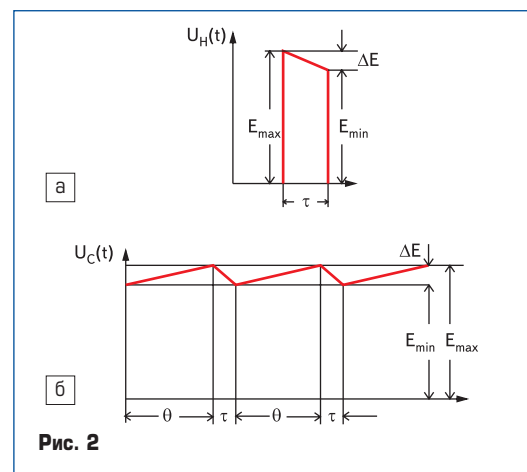
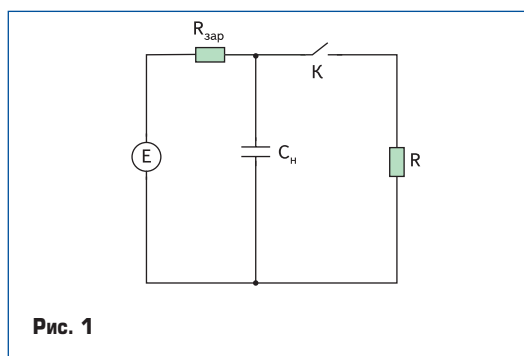
вышающей энергию, выделяемую в нагрузку за один импульс предельной длительности, что при отказе ключа приводит к тяжелым авариям в нагрузке.

При анализе процесса разряда емкостного накопителя пренебрегаем током заряда в схеме (рис. 1) на отрезке времени $t = \tau$. Исходя из схемы, получаем:

$$i_p(t) = \frac{E_{max}}{R} e^{-\frac{t}{C_H R}} \tag{1}$$

$$U_H(t) = E_{max} e^{-\frac{t}{C_H R}}$$

Здесь время отсчитывается от момента замыкания коммутатора. Так как этот момент соответствует моменту окончания процесса заряда, то начальное напряжение на емкости C_H равно E_{max} . Через R обозначено полное сопротивление цепи разряда, равное сумме сопротивления нагрузки и сопротивления коммутатора в замкнутом состоянии. В этом случае напряжение накопителя уменьшается в процессе разряда на величину, определяемую временем включен-



ного состояния коммутатора. На рис. 2а приведена форма импульса напряжения на нагрузке, а на рис. 2б — напряжение на накопительной емкости.

При проектировании генераторов с частичным разрядом емкостного накопителя основной задачей является определение минимально допустимой величины накопителя C_p , при которой величина спада вершины импульса ΔE не превышает заданные значения. При этом задаются величиной сопротивления нагрузки R , максимальной длительностью импульса τ_{max} , амплитудой тока нагрузки I_{max} и допустимой величиной $\Delta E = E_{max} - E_{min}$. Величина E_{max} определяется величиной тока и равна $E_{max} = I_{max}R$. Как следует из (1), ток разряда емкостного накопителя изменяется по экспоненте, и анализ этого процесса традиционно производится во временной области [2]. Величина емкостного накопителя, обеспечивающего заданную величину ΔE , получается при таких расчетах несколько завышенной.

Оценим требуемую минимальную величину емкостного накопителя исходя из закона сохранения заряда. Величины зарядов, потребленного от накопителя q_c и протекшего через нагрузку q_n , равны друг другу. Тогда $q_c = C(E_{max} - E_{min}) = C\Delta E = I_{cp}\tau_{max}$. Считая, что на начальном участке экспонента может быть заменена прямой линией, примем среднее значение тока нагрузки равным

$$I_{cp} = (E_{max} + E_{min}) / 2R.$$

Отсюда следует, что

$$C_H [(E_{max} + E_{min}) / 2\Delta E] \times \tau_{max} / R$$

Частичный разряд емкостного накопителя позволяет использовать резистивный заряд при сохранении высокого значения КПД. Аналитические расчеты КПД резистивного заряда также содержат экспоненциальные члены и учитывают временные интервалы процесса заряда, что усложняет инженерный расчет и не поясняет физическую сторону энергетики процессов резистивного заряда [2].

В тех случаях, когда зарядный резистор является нелинейным, то есть $R_{zap} = f(i)$, или сопротивление резистора меняется в силу каких-либо причин во времени, то есть $R_{zap} = f(t)$, выбор токоограничивающего сопротивления, расчет его средней мощности и определение КПД в каждом конкретном случае становится затруднительным.

Для того чтобы избежать сложных расчетов и одновременно получить точное значение КПД процесса резистивного заряда для произвольных зависимостей вида $R_{zap} = const$, $R_{zap} = f(t)$ или $R_{zap} = f(i)$, докажем следующую теорему.

Теорема 1. КПД процесса резистивного заряда емкостного накопителя от источника постоянного напряжения $E = const$ инвариантен относительно каких-либо изменений значения сопротивления резистора в процессе заряда, не зависит от величины емкостного накопителя и времени заряда, а определяется только уровнями напряжения заряда E_{max} и остаточного напряжения E_{min} .

В этом случае заряд, приобретенный накопителем, —

$$q = C_H (E_{max} - E_{min}).$$

Энергия, потребленная от источника ЭДС в процессе заряда, —

$$W_E = qE = C_H E (E_{max} - E_{min}).$$

Энергия, выделенная в разрядном контуре,

$$W_H = C_H (E_{max}^2 - E_{min}^2) / 2.$$

Определим КПД как

$$\eta = W_H / W_E = C_H (E_{max}^2 - E_{min}^2) / (2C_H E (E_{max} - E_{min})) = (E_{max} + E_{min}) / 2E. \quad (2)$$

Зависимость (2) является доказательством теоремы, поскольку ни величина сопротивления зарядного резистора и его вольт-амперная характеристика, ни временные параметры и значение величины емкостного накопителя здесь не фигурируют, а КПД определяется только предзарядным и остаточным напряжениями накопителя. Из (2) следует, что КПД процесса заряда зависит не только от величины ΔE , но и от отношения E_{max}/E . При заряде накопителя до напряжения $E_{max} < E$ КПД существенно снижается, а при равенстве $E_{max} = E$ и полном разряде накопителя ($E_{min} = 0$) $\eta = 0,5$, что тривиально.

При резистивном заряде емкостного накопителя возникает задача выбора зарядного резистора. Основными параметрами, определяющими этот выбор, являются номинал резистора R_{zap} , его средняя мощность P_{CP} , а также максимальное рабочее напряжение U_{max} . Номинал R_{zap} может быть определен из соотношения постоянной времени цепи заряда $\tau_{zap} = R_{zap}C_H$ и времени заряда, определяемого как $\Theta = T - \tau$, то есть минимальной паузы между импульсами. Достаточно принять $\Theta = (3...5)\tau_{zap}$, что даст величину $R_{zap} = \Theta / (3...5) C_H$. Максимальное рабочее напряжение зарядного резистора должно равняться напряжению холостого хода источника питания, так как в самом начале процесса заряда все напряжение источника питания прикладывается к зарядному резистору, а начальный заряд емкостного накопителя в этот момент равен нулю. Поскольку КПД зарядной цепи определен как $\eta = W_H / W_E$, то энергия, выделенная в зарядном резисторе за один цикл заряда, равна

$$W_R = W_E - W_H \text{ и отсюда } W_R = W_E (1 - \eta).$$

Тогда средняя мощность зарядного резистора:

$$P_{CP} = W_R F,$$

где F — максимальная частота следования импульсов тока нагрузки.

Для генерирования импульсов прямоугольной формы и постоянной длительности обычно используются однородные искусственные линии (ОИЛ) [3]. Параметры ОИЛ выбирают исходя из максимальной длительности импульсов тока нагрузки τ_{max} , ее волнового сопротивления $\rho = R$ для согласованного режима и имеют вид:

$$L_0 = nL_{я}\tau_{max}R / 2,2; C_0 = nC_{я}\tau_{max}/2,2R,$$

где $L_{я}$ и $C_{я}$ — величины индуктивностей и емкостей ячеек, n — число ячеек, $L_0 = nL_{я}$ и $C_0 = nC_{я}$ — суммарные индуктивность и емкость линии.

В согласованном режиме работы ОИЛ вся энергия, запасенная в линии, выделяется в нагрузку за один импульс, и избыток энергии в накопителе отсутствует. Когда необходима плавная регулировка длительности при оперативном ее изменении в процессе работы, может быть применена схема, приведенная на рис. 3 [4]. В этом случае используется симметричность структуры ОИЛ, которая с помощью двух полууправляемых ключей VT1 и VT2 подключается с одной стороны к нагрузке R_H , а с другой — к балласту $R_{бал} = R_H$.

Изменяя моменты включения ключей VT1 и VT2, можно получить в нагрузке импульс, длительность которого τ_{var} будет меняться в пределах от 0 до τ_{max} . При генерировании импульсов, длительность которых больше $0,5\tau_{max}$, первым включается ключ VT1 и с определенной задержкой ключ VT2. Если ключи VT1 и VT2 замыкаются одновременно, длительности импульсов тока нагрузки и балласта будут равны $0,5\tau_{max}$. При необходимости генерирования импульсов с длительностью $\tau_{var} < 0,5\tau_{max}$ первым включается ключ VT2, а затем ключ VT1. В общем виде:

$$\tau_{var} = 0,5\tau_{max} (0,5 + t_{*зад}^*), \quad (3)$$

где $t_{*зад}^*$ — относительное время задержки, определяемое временами включения ключей VT1 и VT2 ($t_{к1}$ и $t_{к2}$ соответственно).

$$t_{*зад}^* = (t_{к1} - t_{к2}) / \tau_{max}.$$

На рис. 4 приведен укороченный импульс тока нагрузки (кривая 1) и импульс тока балласта (кривая 2), полученные при разряде

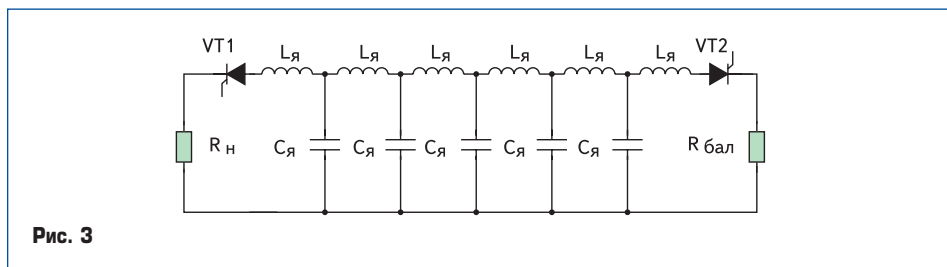
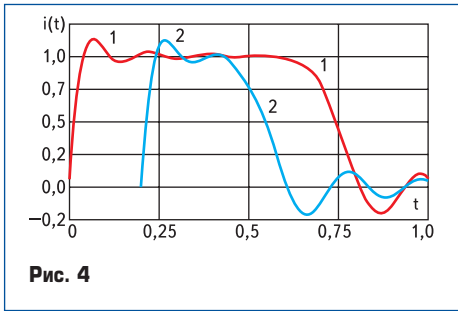


Рис. 3



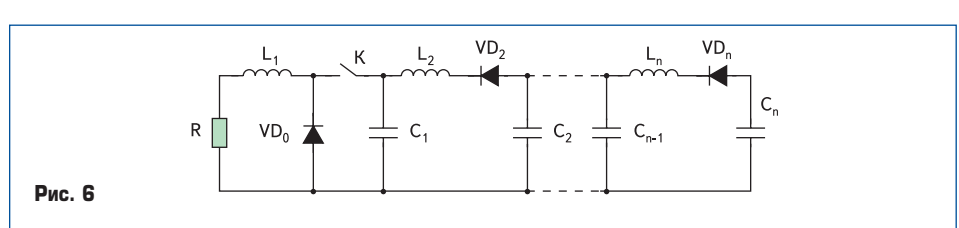
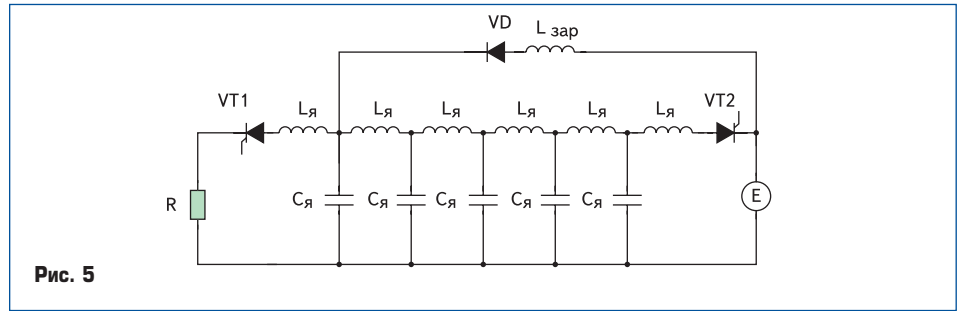
10-звенной нормированной ОИЛ. Ключ нагрузки VT1 был включен в нулевой момент времени, а ключ балласта VT2 — в момент времени $t = 0,2$ с. Очевидным недостатком этого решения является низкий КПД процесса разряда, прямо пропорциональный длительности импульса тока нагрузки: $\eta = \tau_{var} / \tau_{max}$.

В тех случаях, когда в генераторе применен резонансно-диодный заряд линии, напряжение заряда линии $U_{зар} = 2E$ и вместо балласта может быть использован источник зарядного напряжения E (рис. 5).

Ненагруженный конец ОИЛ с помощью ключа VT2 подключается к источнику E . Поскольку режим разряда линии на источник ЭДС E является согласованным для случая $U_{зар} = 2E$, в линии будут отсутствовать отраженные волны, и процесс регулирования длительности импульсов будет аналогичен предыдущему. Длительность импульса нагрузки также определяется зависимостью (3), но в этом случае КПД процесса разряда близок к единице, поскольку происходит рекуперация неиспользованной энергии ОИЛ в источник ЭДС.

Длительность импульсов, генерируемых ОИЛ, также можно регулировать с помощью силового, полностью управляемого ключа. Такой способ возможен в том случае, когда первая индуктивность вынесена к нагрузке, и при этом она шунтирована нулевым диодом. Тем не менее, в таком виде это схемное решение мало приемлемо на практике, так как после отключения ключа в структуре ОИЛ возникают затухающие колебания, которые приводят к потерям энергии и существенно снижают частотные свойства генератора в целом. Учитывая тот факт, что токи индуктивных элементов ОИЛ практически являются униполярными, для устранения колебаний в структуру ОИЛ введены управляемые вентили, включенные последовательно с индуктивностями ячеек (рис. 6), что позволяет реализовывать генераторы с высокими технико-экономическими показателями [5].

Расчет параметров ОИЛ с вентилями (ОИЛВ) аналогичен расчету параметров ОИЛ и при формировании импульсов максимальной длительности τ_{max} в согласованном режиме отличие форм импульсов ОИЛ и ОИЛВ заключается лишь в несущественном увеличении длительности среза импульса τ_{cp} у ОИЛВ по сравнению с ОИЛ (рис. 7а). Но поскольку ОИЛВ предназначена для генерирования импульсов регулируемой длительности $\tau_{var} < \tau_{max}$, длительность среза при этом определяется только параметрами полностью управляемого ключа и постоянной времени $L1/R$. На рис. 7б показаны импульсы тока нагрузки $i(L1)$ и остальных индуктивных эле-

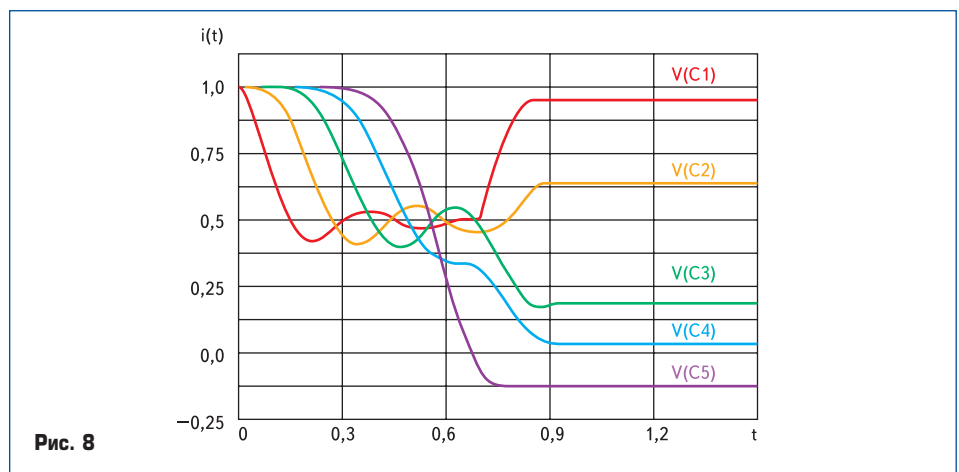
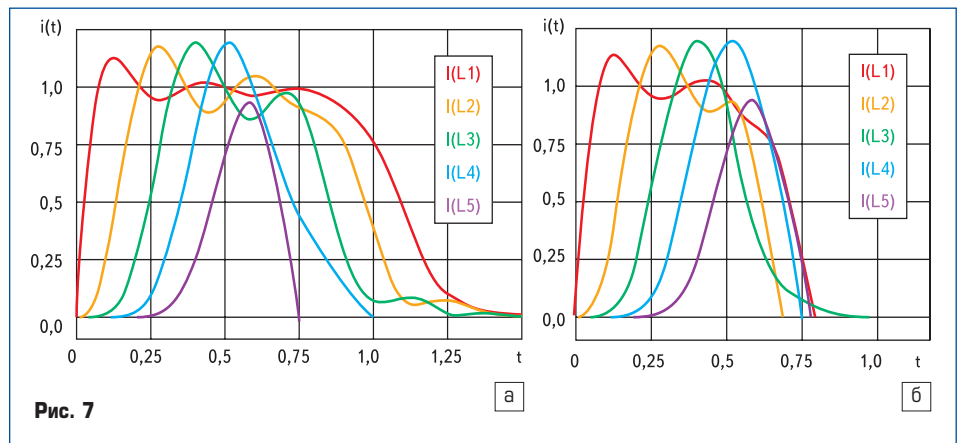


ментов для случая $\tau_{var} = 0,5$ с. На рис. 8 приведены временные зависимости напряжений на емкостях 5-звенной ОИЛВ для случая $\tau_{var} = 0,7$ с. Уже при $t = 0,9$ с переходный процесс завершен. Величины остаточных напряжений на емкостях зависят от длительности импульса тока нагрузки и могут быть как положительными, так и отрицательными, что необходимо учитывать при создании зарядного устройства ОИЛВ.

Одним из существенных преимуществ ОИЛВ является возможность создания генераторов импульсов тока регулируемой длительности с произвольно выбранными значениями волнового сопротивления, которое может быть существенно меньше значения сопротивления нагрузки. Режим работы ОИЛВ будет при этом несогласованным и апериди-

ческим, что в принципе несущественно при наличии полностью управляемого силового ключа. Но при этом появляется возможность на этапе проектирования ОИЛВ за счет варьирования расчетного значения волнового сопротивления линии подобрать параметры конденсаторов ячеек таким образом, чтобы они были кратны стандартному ряду номиналов. Кроме этого, уменьшение значения волнового сопротивления линии приводит к увеличению ее суммарной емкости, но при этом уменьшается ее индуктивность, что позволяет изготавливать генераторы с уменьшенными массообъемными и улучшенными технико-экономическими показателями.

Существенным достоинством ОИЛ, и соответственно ОИЛВ, является ее цепочечная структура, что позволяет регулировать дли-



тельность импульсов тока нагрузки за счет разряда различного числа ячеек. При этом максимальная дискретность регулирования определяется числом звеньев линии:

$$\Delta\tau = \tau_{\max} / n.$$

В принципе n -звенную линию можно разделить на отрезки, число которых $m_1 < n$, но при этом уменьшается диапазон и снижается точность регулирования длительности. На рис. 9 приведены импульсы тока нагрузки 10-звенной линии при включении двух, четырех, шести, восьми и десяти ячеек. На рисунке видно, что при таком способе регулирования увеличиваются относительные длительности фронта и среза, но их абсолютная величина остается неизменной. Практическую реализацию данного способа регулирования длительности можно осуществить, используя ОИЛВ и два принципиально различных подхода: заряд посредством электронного или электромеханического зарядного коммутатора необходимого числа ячеек ОИЛВ, разряд которой на нагрузку обеспечивается одним разрядным ключом VT (рис. 10); разряд необходимого числа ячеек полностью заряженной ОИЛВ с полупроводящими вентилями, также включенными последовательно с индуктивностями ячеек (рис. 11).

При одновременном включении всех вентилях VT такая линия формирует прямоугольные импульсы максимальной длительности, а более короткие импульсы — при одновременном включении части вентилях VT, расположенных ближе к нагрузке. При этом требуется зарядное устройство, обеспечивающее раздельный заряд каждой ячейки.

Более перспективный способ дискретной регулировки длительности ОИЛ — это способ разбиения цепочечной структуры линии на отрезки, формирующие импульсы разной длительности. Коммутация таких отрезков

на нагрузку в различной последовательности позволяет заметно сократить число разрядных управляемых вентилях. Рассмотрим ОИЛ, содержащую n звеньев и разделенную на m_2 неодинаковых отрезков таким образом, что длительность импульса, формируемого каждым последующим отрезком, в два раза больше, чем предыдущим: $\tau_{j+1} = 2\tau_j$, где $1 \leq j \leq m_2$. Приведенная на рис. 12 схема генератора позволяет формировать в нагрузке импульсы, длительность которых изменяется дискретно в диапазоне $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$. При этом

$$\begin{aligned} \tau_{\min} &= \Delta\tau = \tau_1; \\ \tau_{\max} &= (2^{m_2} - 1) \times \tau_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_1 — длительность импульса, формируемого первым отрезком ОИЛ, который может состоять из нескольких ячеек. Работа схемы (рис. 12) обеспечивается тем, что выход любого j -го отрезка линии соединен полупроводящим вентилем с входами каждого предыдущего отрезка ($m-1, \dots, (j-1), (j-2), \dots, 2, 1$) и с нагрузкой, то есть число вентилях j -го отрезка равно j . Исходя из этого общее число вентилях в этой схеме равно:

$$\gamma_2 = \sum_{j=1}^{m_2} j = \frac{(m_2 + 1)m_2}{2}.$$

Сравним схемы генераторов (рис. 10 и 11) и генератора, схема которого приведена на рис. 12, по количеству используемых вентилях при одинаковых значениях τ_{\max} .

Для одинаковых относительных величин дискрет этих двух схем $\Delta\tau_1^* = \Delta\tau_2^*$ с учетом того, что

$$\Delta\tau_1^* = 1/m_1; \Delta\tau_2^* = 1/(2^{m_2} - 1),$$

получим, что уже при $m_2 \geq 2 \Delta\tau_2^* \leq \Delta\tau_1^*$, где $\Delta\tau_1^*$ и $\Delta\tau_2^*$ — относительные величины

минимальных длительностей импульсов, реализуемых соответственно при равномерном и неравномерном законе разбиения ОИЛ на одинаковое число отрезков. В случае использования обычной ОИЛВ число вентилях $\gamma_1 = n$, а при разбиении этой линии на m_1 одинаковых отрезков $\gamma_1 = m_1$.

При двоичном законе разбиения ОИЛ на отрезки максимальная длительность импульса:

$$\tau_{\max} = \Delta\tau_2(2^{m_2} - 1),$$

откуда

$$m_2 = \log_2(\tau_{\max}/\Delta\tau_2 + 1).$$

Отсюда следует, что для одинаковых величин дискретности $\Delta\tau^* < 0,33$ вариант разбиения ОИЛ на отрезки по закону двоичного кода предпочтительнее по числу используемых вентилях, чем при равномерном разбиении.

Литература

1. Забродин Ю. С. Узлы принудительной конденсаторной коммутации тиристоров. М.: Энергия, 1974.
2. Нейман М. С. Курс радиопередающих устройств. М.: Советское радио, 1965.
3. Опре В. М. Генераторы прямоугольных импульсов тока на основе однородных искусственных линий // Силовая электроника. 2008. №1.
4. Ауслендер В. Л., Ильин О. Г., Шендерович А. М. Формирование импульсов тока регулируемой длительности // Приборы и техника эксперимента. 1962. № 3. С. 81–83.
5. А. С. СССР № 400980 МКИ НОЗК 3/335. Генератор импульсов тока переменной длительности / Бендиктов Г. Л., Михайлов Н. И., Опре В. М. // 1973. Б. И. № 40.

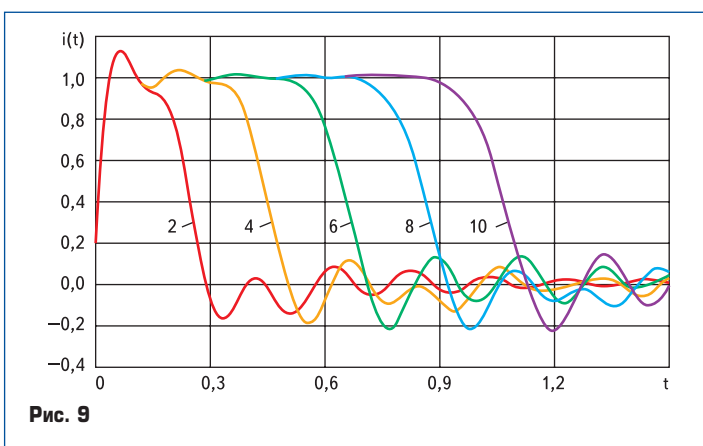


Рис. 9

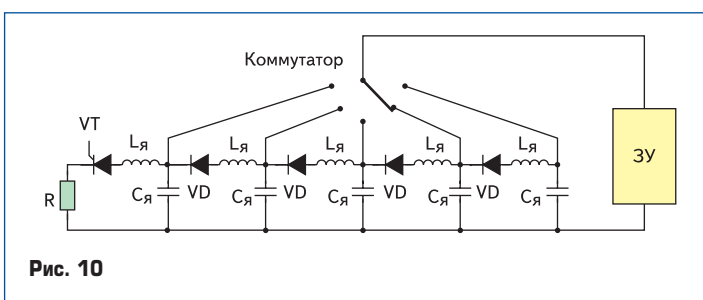


Рис. 10

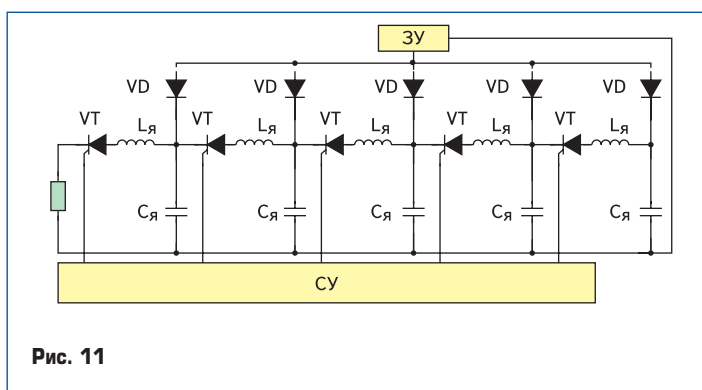


Рис. 11

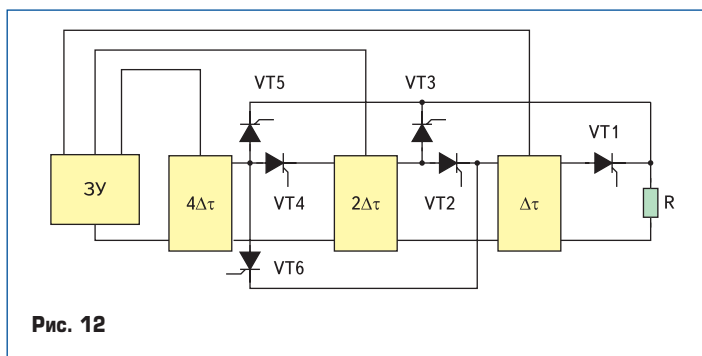


Рис. 12