

# Генерирование мощных импульсов тока регулируемой формы

**В ряде импульсных технологий, в первую очередь таких, как лазерная импульсная сварка, лазерная прошивка, лазерная размерная обработка, контактная конденсаторная сварка и т. п., форма импульса тока нагрузки существенно влияет на качество и производительность процессов. В статье приводятся схемные решения генераторов, обеспечивающих регулирование формы мощных импульсов тока нагрузки в диапазоне длительностей от десятков микросекунд до единиц миллисекунд. Амплитуды токов нагрузки при этом могут достигать нескольких тысяч ампер, а уровни напряжений — десятков тысяч вольт.**

Виктор Опред, д. т. н.

oprevm@yandex.ru

**П**роблема создания генераторов мощных импульсов тока регулируемой формы (ГИТРФ) впервые возникла в технике физического эксперимента. Помимо этого потребности импульсных электротехнологий (лазерные сварка и прошивка, термоупрочнение, разделительная резка, конденсаторная контактная сварка и пр.) диктовали необходимость появления ГИТРФ в производственных условиях. В первую очередь электротехнологические ГИТРФ нужны технологам в качестве инструмента, позволяющего экспериментально определить основные параметры импульсного технологического процесса, включая форму тока, с целью повышения как качества процесса, так и его производительности. Помимо этого импульсные электротехнологические установки с регулируемыми в широких пределах амплитудно-временными параметрами импульсов представляют большой интерес при работе в условиях малосерийного производства, с частыми изменениями номенклатуры выпускаемых изделий и видов конструкционных материалов.

В последнее время для генерирования импульсов тока регулируемой формы в диапазоне длительностей до нескольких миллисекунд при уровнях тока нагрузки в несколько сотен ампер успешно используются высокочастотные преобразователи, работающие в режиме широтно-импульсного или частотно-импульсного регулирования [1]. В таких преобразователях применяются современные силовые транзисторы, способные коммутировать токи в сотни ампер на частотах в десятки килогерц. Тем не менее, при необходимости получения импульсов регулируемой формы, когда уровни токов достигают величин в тысячи ампер при напряжениях в несколько тысяч вольт и малых длительностях импульсов (порядка десятков и сотен микросекунд), такие схемные решения становятся неприемлемыми.

Известно, что для генерирования мощных импульсов тока (или напряжения) прямоугольной формы

наиболее часто используются однородные искусственные линии (ОИЛ), обладающие рядом достоинств по сравнению с формирующими цепями других видов [2, 3]. Необходимо помнить, что ОИЛ является физическим аналогом (моделью) эквивалентной длинной линии с распределенными параметрами (ДЛРП). В работе [4] введено понятие длинной линии с распределенным ключом (ДЛРК), эквивалентом которой является ОИЛ с ключами в ячейках — ОИЛК, а также сформулирована и доказана теорема, определяющая взаимосвязь формы эпюры зарядного напряжения ДЛРК, то есть  $u(x^*)$ , где  $x^* = x/l$  — относительная линейная координата линии, и формы импульса тока нагрузки  $i(t^*)$ , где  $t^* = t/\tau$  — относительное время ( $\tau$  — длительность импульса тока нагрузки).

Графическая иллюстрация теоремы, рассмотренной в [4], приведена на рис. 1. Переход от ДЛРК к эквивалентной ОИЛК также может быть осуществлен известным способом разбиения линии на  $n$  отрезков. При этом сумма распределенных индуктивностей и емкостей каждого отрезка заменяется сосредоточенными элементами  $L_{я}$  и  $C_{я}$ , а распределенный ключ каждого отрезка — одним ключом. Генератор с ОИЛК содержит на  $(n-1)$  ключей больше, чем обычный генератор с ОИЛ, но сохраняет все его основные преимущества (рис. 2). Ключи ячеек должны включаться поочередно во времени с запаздыванием, определяемым временем распространения электромагнитной волны в эквивалентной ДЛРП, то есть должен быть использован «волновой» закон управления.

Для получения тока нагрузки заданной формы с помощью ОИЛК необходимо задать форму зарядного напряжения эквивалентной ДЛРК  $u(x^*)$ , после чего может быть определен закон изменения  $i(t^*)$  на каждом отрезке линии с условием равенства числа отрезков числу ячеек ОИЛК. Схема, приведенная на рис. 2, содержит коммутатор зарядного тока (КЗТ), выполненный на полупроводниковых вентилях  $VD_1 - VD_n$ . КЗТ вкупе с системой управления

обеспечивает отдельный регулируемый заряд каждой из ячеек при питании от одного общего зарядного устройства. Задача определения зарядных напряжений  $U_k$  емкостей ячеек ОИЛК при генерировании импульсов самых разнообразных форм решается неоднозначно, так как напряжения заряда отрезков эквивалентной ДЛРК отличаются в начале и конце отрезка. Так, емкости могут быть заряжены до напряжений, соответствующих начальному, конечному или среднему точкам отрезков, а импульсы тока нагрузки  $i(t^*)$  в случае гладкой функции  $u(x^*)$  будут незначительно отличаться друг от друга по форме, но существенно по амплитуде. Для однозначного определения  $U_k$  можно использовать условия равенства энергий, запасенных в эквивалентной ДЛРК и в ОИЛК.

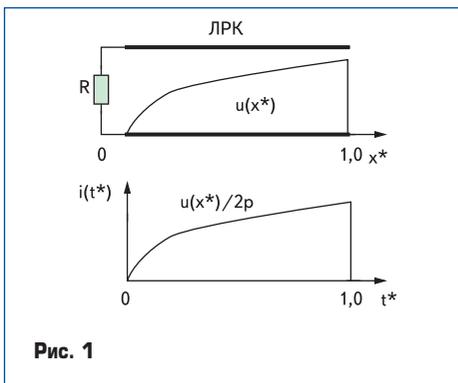


Рис. 1

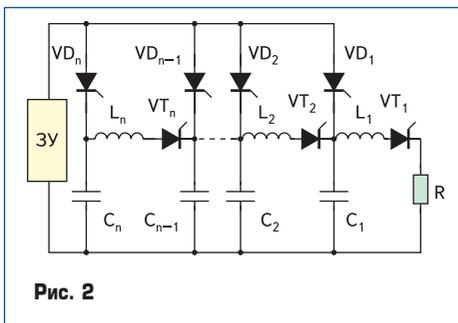


Рис. 2

Выбрав эквивалентную длинную линию с суммарной емкостью  $Cл$ , получим (1), где  $Wk$  — энергия  $k$ -й ячейки ОИЛК. Тогда напряжение заряда емкости  $Ck$  будет равно  $Uk = \sqrt{2Wk/Ck}$ . Волновой закон коммутации ключей определяется временем включения ключа с номером  $k$  при разбиении ЛРК на отрезки  $t_k = 1(k-1)\tau' / 2n$ .

Для ОИЛК в результате численного анализа и экспериментальной проверки получено уточненное значение:

$$t_k = 0,93(k-1)\tau/2n.$$

Все параметры ОИЛК рассчитываются так же, как и для обычной ОИЛ. При этом

$$\tau \approx 2,2\sqrt{L_0 C_0}, L_0 = nL_{я} = \tau R/2,2; C_0 = nC_{я} = \tau/2,2R.$$

$$W_{ДЛРК} = C_{л} / 2 \left[ \int_0^{1/n} u(x^*)^2 dx^* + \int_{1/n}^{2/n} u(x^*)^2 dx^* + \dots + \int_{(n-1)/n}^1 u(x^*)^2 dx^* \right] = \sum_{k=1}^n W_k, \quad (1)$$

Выбор ключей осуществляется по максимальному значению зарядного напряжения ячеек, амплитудному значению тока ключа, которое может быть принято равным амплитудному значению тока нагрузки, и по величине среднего тока. Средний ток первого ключа  $I_{ср1}$  равен среднему току нагрузки, а средний ток  $k$ -го ключа  $I_{ср k} = I_{ср1}(n+1-k)/n$ . Обычно все ключи выбираются одинаковыми, в силу чего ключи с номером  $k > 1$  недогружены, как, впрочем, и индуктивности в обычной ОИЛ. На рис. 3 приведены токи нагрузки 5-звенной ОИЛК, причем кривая 1 показывает предельный прямоугольный импульс тока для случая  $u(x^*) = \text{const}$ , кривая 2 соответствует линейно-спадающему закону  $u(x^*) = (1-x^*)$ , а кривая 3 — линейно-нарастающему  $u(x^*) = x^*$ .

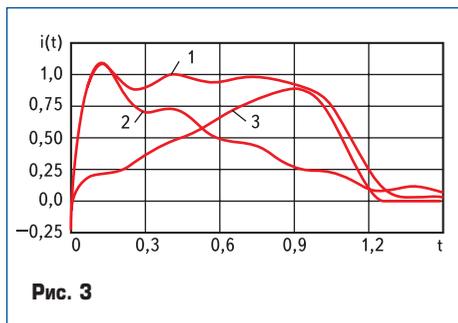


Рис. 3

Следует отметить, что при одновременной коммутации ключей ( $t_k = 0$ ) форма импульса тока будет симметричной относительно середины длительности импульса. На рис. 4 приведены токи нагрузки 5-звенной ОИЛК, причем кривая 1 показывает предельный прямоугольный импульс тока для случая  $u(x^*) = \text{const}$ , кривая 2 соответствует линейно-спадающему закону  $u(x^*) = (1-x^*)$ , а кривая 3 — линейно-нарастающему  $u(x^*) = x^*$ .

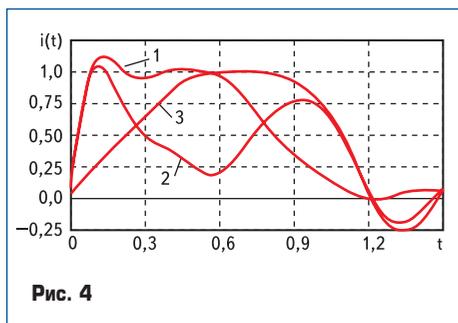


Рис. 4

Кроме вышеприведенных примеров, с помощью ОИЛК можно генерировать модулированные импульсы, представляющие определенный интерес в импульсных электротехнологических процессах и установках. На рис. 5 приведен модулированный импульс тока нагрузки 5-звенной ОИЛК, ячейки которой были заряжены одинаково, а величина задержек  $t_k$  между моментами включения управляемых вентилях при генерировании модулированных импульсов увеличена для различных случаев в 3,5–4 раза.

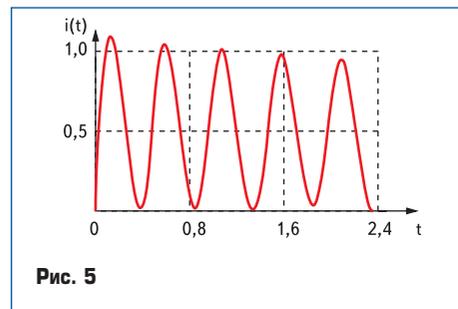


Рис. 5

На рис. 6 и 7 приведены модулированные импульсы той же ОИЛК для случая линейно-спадающей и линейно-нарастающей эпюры напряжений заряда.

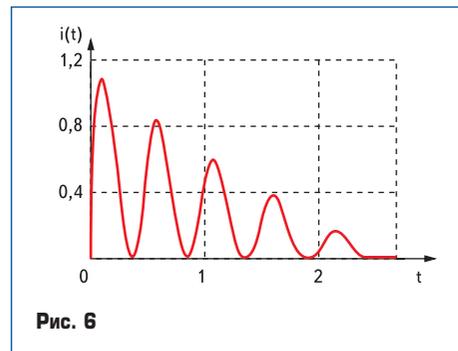


Рис. 6

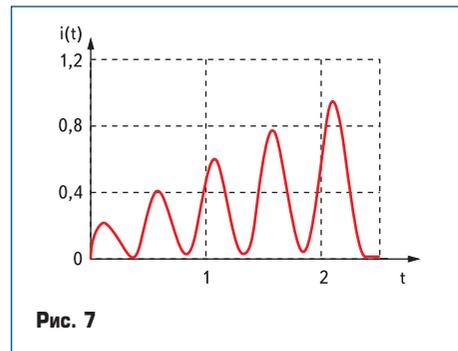


Рис. 7

В целом ряде случаев возникает необходимость включения управляемых ключей последовательно с емкостями ячеек ( $C$ -ключи), так как при этом катоды и управляющие электроды полууправляемых вентилях (тиристоров или тиратронов) присоединяются к общей «земляной» шине, что существенно при реализации таких генераторов (рис. 8). Но при этом полууправляемые вентили должны быть шунтированы диодами, а выходы многоканального зарядного устройства (в том числе и КЗТ) оторваны от потенциала «земли».

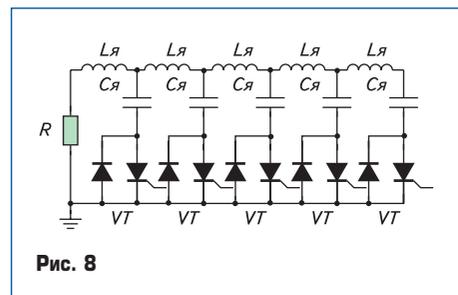
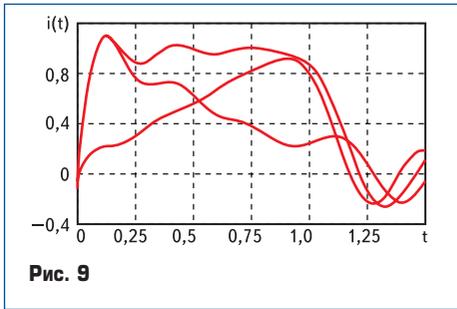


Рис. 8

На рис. 9 приведены токи нагрузки этой схемы для трех эпюр напряжения заряда, которые практически полностью совпадают с токами нагрузки ОИЛ с  $L$ -ключами (рис. 3).

Кроме этого, один из видов ГИТРФ на основе многополюсников с неодновременной



коммутацией входов может быть реализован с помощью расщепленного емкостного накопителя (РЕН), подключаемого к нагрузке через Т-образный формирующий четырехполюсник ключами с односторонней проводимостью. Принципиальная схема такого генератора приведена на рис. 10 [5]. Определенным преимуществом этого генератора, представляющего собой многополюсник, содержащий  $n$  конденсаторов  $C_1 \dots C_n$  и  $n$  ключей  $VT_{разр}$ , коммутирующих вход формирующего четырехполюсника  $L_1-L_2-C_\Phi$  является существенная экономия индуктивных элементов, поскольку их число в данном случае равно двум и не зависит от числа ячеек генератора. В таких генераторах форма импульса тока нагрузки также определяется эпорой зарядных напряжений конденсаторов РЕН, а регулирование этих уровней производится с помощью коммутатора зарядного тока (КЗТ), выполненного на тиристорах  $VT_{зар}$ . Следует отметить, что в отличие от ГИТРФ, выполненных на основе ОИЛК и имеющих простой квазиволновой закон коммутации разрядных ключей, в генераторах на основе РЕН и формирующего четырехполюсника определение закона коммутации является сложной задачей, не имеющей однозначного решения. В связи с этим для определенности принято, что моментом появления управляющего сигнала на последующем разрядном вентиле каждой ячейки является момент разряда конденсатора предыдущей ячейки до нуля. Это условие достаточно просто реализуется на практике с помощью системы управления и позволяет гарантировать полный разряд РЕН к моменту окончания процесса формирования импульса тока нагрузки. Расчетные соотношения, определяющие основные параметры элементов генератора в зависимости от значения нагрузки  $R$ , длительности предельного прямоугольного импульса  $\tau$  и числа ячеек  $n$  выглядят следующим образом:

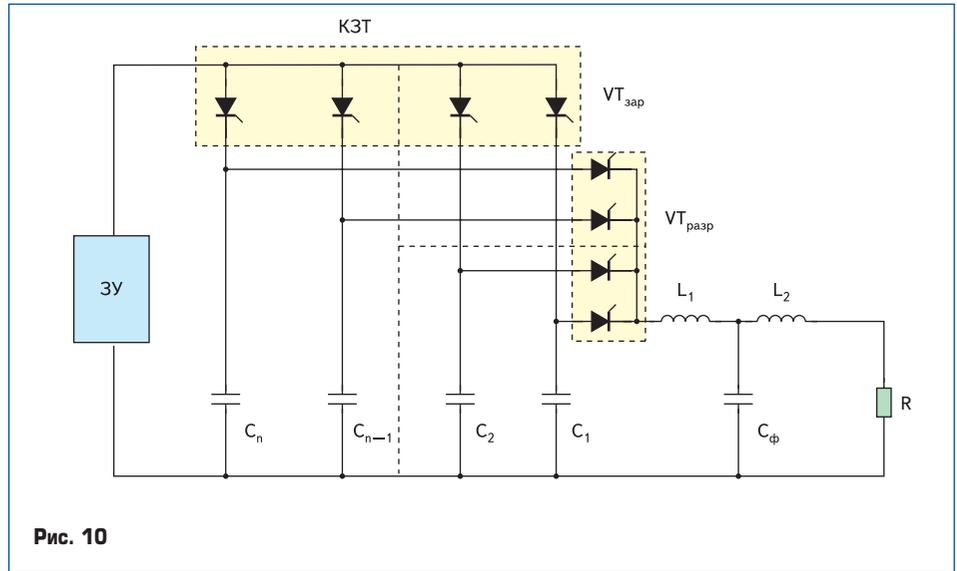
$$L_1 = 0,7R\tau / (0,998n + 0,784);$$

$$L_2 = 0,25R\tau / (0,998n + 0,784);$$

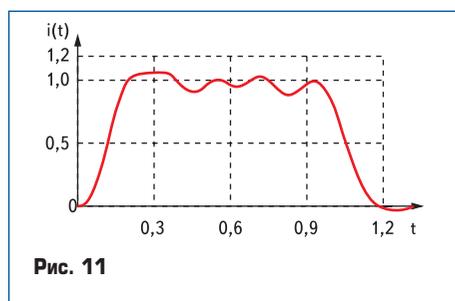
$$C_\Phi = C_\gamma = 0,5\tau / [(0,998n + 0,784) \times R]$$

Напряжение заряда конденсаторов ячеек (для предельного прямоугольного импульса)  $UC = 2,012IR$ , где  $I$  — максимальная амплитуда тока нагрузки.

Относительные длительности фронта и среза импульса зависят от числа ячеек и уменьшаются с ростом величины  $n$ . В качестве примера на рис. 11 приведена рассчитанная в нормированных величинах временная зависимость тока нагрузки РЕН для случая равенства зарядных напряжений всех емкостей ячеек. Из ри-

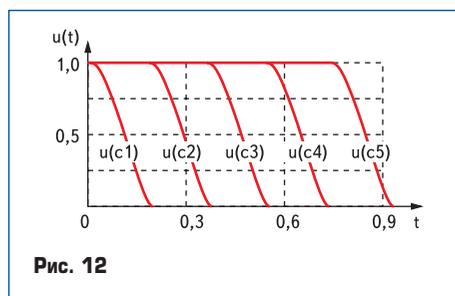


сунка видно, что амплитуды пульсаций на плоской части импульса существенны и импульс тока требует коррекции формы.



На практике такая коррекция осуществляется незначительным изменением в системе управления уровней уставок зарядных напряжений, определяющих моменты включения разрядных вентилях, что позволяет достаточно просто обеспечить приемлемую форму импульса тока нагрузки при сохранении почти согласованного режима разряда.

На рис. 12 представлены временные зависимости изменения нормированных величин напряжений емкостей ячеек 5-звенного РЕН при поочередном разряде конденсаторов за время формирования импульса. Видно, что каждая ячейка разряжается практически до нуля и остаточная энергия РЕН также близка к нулю.



В результате коррекции формы импульса уровни остаточных напряжений на емкостях ячеек могут отличаться от нуля, что при резонансно-диодном заряде приводит к изменению начальных условий процесса заряда ячеек генератора. Однако при работе генератора в частотном режиме при пороговом законе управления КЗТ в случае изменения уровней остаточных напряжений генератор автоматичес-

ки выходит в установившийся режим, при котором обеспечивается требуемая форма эпюры зарядных напряжений РЕН.

Дополнительным преимуществом таких генераторов является возможность произвольного чередования порядка включения разрядных вентилях, поскольку все конденсаторы ячеек РЕН подключаются к общей точке. Это позволяет при необходимости исключить КЗТ, а заряд конденсаторов ячеек РЕН производить от  $n$  простых самостоятельных нерегулируемых зарядных устройств, имеющих различные уровни собственных зарядных напряжений, значения которых могут отличаться между собой, скажем, на величину  $U_{max}/n$ . При этом можно получать в нагрузке импульсы как нарастающей, так и спадающей форм, исключив из структуры генератора КЗТ и его систему управления, что существенно упрощает устройство в целом и снижает его стоимость. Наиболее полно это преимущество генераторов на основе РЕН проявляется в высоковольтных установках, когда в качестве управляемых вентилях используются тиратроны, экситроны, игнитронные или вакуумные разрядники.

Процедура расчета и проектирования формирователей ГИТРФ, выполненных на основе ОИЛ, производится следующим образом. В первую очередь, считая нагрузку линейной и резистивной, а режим работы согласованным, определяют основные параметры ОИЛ — количество ячеек линии  $n$ , величины индуктивностей  $L_\gamma$  и конденсаторов  $C_\gamma$  ячеек. Выбор конденсаторов, коммутирующих приборов и расчет катушек индуктивностей производится для наиболее тяжелого режима, когда в нагрузке генерируются импульсы предельной прямоугольной формы и максимальной амплитуды при максимальной частоте следования. Этот расчет аналогичен расчету обычной ОИЛ и позволяет определить почти все основные параметры элементов. Для выбора коммутирующих приборов (тиристоров, тиратронов, игнитронных или вакуумных разрядников и т. п.), кроме знания величин максимальных и действующих значений токов этих элементов необходимо также определить их средний ток. Поскольку обычно все приборы выбираются одинаковыми, следует ориентироваться на ве-

личину среднего тока самого нагруженного из них. Для ГИТДФ, у которых вентили включены последовательно с катушками индуктивности ячеек (L-ключи), это вентиль, подключенный непосредственно к нагрузке. Средний ток этого прибора в согласованном режиме равен:

$$I_{\text{cp}} = C_0 U_{\text{max}} F_{\text{max}}$$

где  $C_0$  — суммарная емкость линии,  $U_{\text{max}}$  — максимальное напряжение заряда ячеек,  $F_{\text{max}}$  — максимальная частота следования импульсов. Иная ситуация возникает в тех случаях, когда коммутирующие приборы включены последовательно с конденсаторами ячеек (C-ключи). Такие схемы применяются в высоковольтных установках, поскольку подключение катодов коммутирующих приборов к общей шине, имеющей потенциал «земли», существенно упрощает как систему управления, так и цепи накала катодов. Выбор коммутирующих приборов в этом случае следует делать после определения максимальных и средних значений токов отдельных ячеек ОИЛ. Средние токи вентиля можно принять равными:

$$I_{\text{cp}} = C_{\text{я}} U_{\text{max}} F_{\text{max}}$$

а максимальные токи считать равными максимальному току нагрузки, хотя точный анализ показывает, что максимальные токи емкостей ячеек несколько меньше. Расчет катушек индуктивностей (выбор сечения проводников) должен производиться как с учетом действующих значений токов этих катушек, так и с учетом требуемой добротности ОИЛ. Помимо этого катушки индуктивностей должны выдерживать максимальные напряжения, обычно равные максимальным напряжениям заряда, а электродинамические силы, возникающие в них, не должны приводить к их разрушению. Современные программные средства, ориентированные на анализ электрических цепей, позволяют сравнительно просто рассчитать все искомые величины для каждого конкретного случая. Расчет электромагнитных сил в индуктивных элементах представляет собой отдельную и сравнительно сложную задачу, но необходимость в этих расчетах возникает достаточно редко.

## Литература

1. Никитин А. М., Опре В. М., Коротаев Н. В., Герасев О. А., Левантовский Г. М. /А. С. СССР №1648681 МКИ В23К 11/26. Конденсаторная сварочная машина с регулируемым импульсом сварочного тока // 1991. Б. И. № 18.
2. Опре В. Генераторы прямоугольных импульсов тока на основе однородных искусственных линий // Силовая электроника. 2008. № 1.
3. Опре В. Генераторы прямоугольных импульсов тока на основе однородных искусственных линий // Силовая электроника. 2008. № 2.
4. Опре В.М. Генераторы импульсов тока регулируемой формы для накачки лазерных технологических установок // Электротехника. 1989. № 9.
5. П.М. № 15060 RU 7 Н 03 К 3/36. Генератор импульсов тока / Аллас А. А., Громовенко А. В., Коротков А. Ю., Опре В. М., Федоров А. В. // 2000. Бюл. № 25.