

Генераторы прямоугольных импульсов тока

на основе однородных искусственных линий

Данный материал предваряет цикл статей, в которых рассматриваются схемные решения генераторов мощных импульсов тока с регулируемыми амплитудно-временными параметрами и приводятся их основные расчетные соотношения. Тема этой статьи — электромагнитные процессы в мощных генераторах прямоугольных импульсов тока, в которых в качестве накопительных и формирующих цепей используются однородные искусственные линии. В следующих работах будет показано, как на основе однородной искусственной линии, принятой за базовую схему, решаются задачи генерирования импульсов регулируемой длительности и формы.

Виктор Опре, д. т. н.

Для генерирования мощных прямоугольных импульсов тока или напряжения микросекундного или миллисекундного диапазона длительностей из четырех канонических схем реактивных формирующих двухполюсников (ФД) предпочтение отдается однородной искусственной линии (ОИЛ) [1]. Основное ее преимущество, которое проявляется при практической реализации генераторов на ее основе, — это равенство друг другу значений индуктивностей и емкостей ячеек, что существенно облегчает конструирование и изготовление линий. Помимо этого, ОИЛ в силу своей цепочечной структуры — это физический аналог (модель) длинной линии с распределенными параметрами (ДЛРП), что иногда позволяет существенно упростить анализ электромагнитных процессов.

Эквивалентная схема ОИЛ, учитывающая конечное значение добротности индуктивных элементов, приведена на рис. 1. Потери, определяемыми утечками конденсаторов, пренебрегаем.

ОИЛ представляет собой цепочечное соединение n однотипных Г-образных четырехполюсников. Используя соотношения, связывающие между собой в операторной области токи и напряжения в отдельных четырехполюсниках через ток и напряжение на входе цепи, можно найти переходные характеристики для любого элемента ОИЛ во временной области.

Так, для токов индуктивных элементов и напряжений на емкостях получим:

$$i_s(t) = \frac{4E\sqrt{C_{я}}}{\sqrt{L_{я}}(2n+1)} e^{-\beta t} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\cos \Theta_k \times \cos [2\Theta_k(s+0,5)]}{\omega_k} \sin \omega_k t; \tag{1}$$

$$u_s(t) = E \left[1 - \frac{2}{2n+1} e^{-\beta t} \sum_{k=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \Theta_k \times \times \sin 2\Theta_k s \left(\frac{\beta}{\omega_k} \sin \omega_k t + \cos \omega_k t \right) \right], \tag{2}$$

где E — напряжение заряда линии; $(s-1)$ — номер индуктивного элемента; s — номер емкостного элемента; $s = 1, 2, \dots, n$; $\beta = R_{я}/L_{я}$; $\Theta_k = \pi(2k+1)/2(2n+1)$; $\omega_k = \sqrt{\omega_0^2 \sin^2 \Theta_k - \beta^2}$; $\omega_0 = 2/\sqrt{L_{я}C_{я}}$ [2].

Из (1) следует, что переходная проводимость ОИЛ ($E = 1, s = 1$) представляет собой сумму из n синусоид, имеющих не кратные частоты и различные амплитуды, причем зависимости (1) и (2) являются точными аналитическими зависимостями. Анализ переходных процессов в ОИЛ, нагруженной на линейную активную нагрузку, в аналитическом виде представляет собой чрезвычайно сложную задачу, не имеющую общего решения, поэтому необходимо применить численные методы [3, 4]. Следует отметить, что зависимости (1) и (2) позволяют оценить точность численных расчетов, которые при коротком замыкании ОИЛ должны совпасть с результатами, полученными с помощью зависимостей (1) и (2).

На рис. 2 приведены временные зависимости токов нагрузки ОИЛ, работающей в согласованном режиме (то есть $\rho = R$, где $\rho = \sqrt{L_{я}/C_{я}}$ — волновое

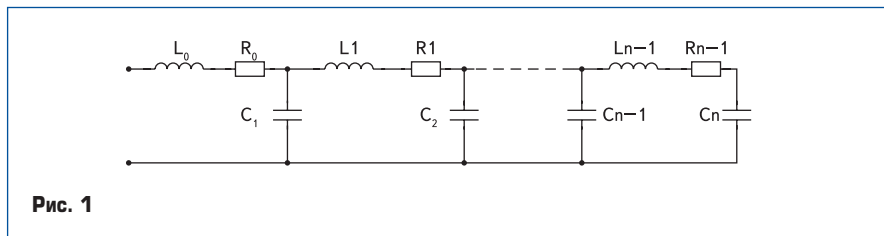


Рис. 1

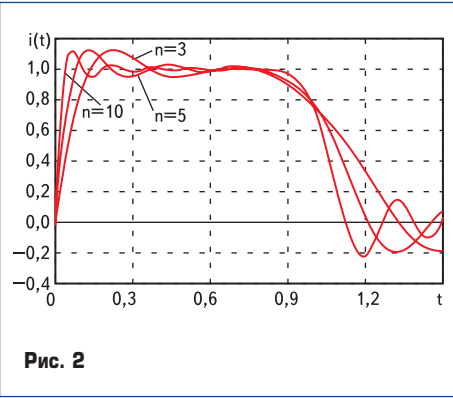


Рис. 2

сопротивление ОИЛ, а R — сопротивление нагрузки) для различного числа ячеек $n = 3, 5$ и 10 , а на рис. 3 — токов индуктивностей 5-звенной ОИЛ. Все зависимости получены в нормированном виде для длительности $\tau = 1$ и волнового сопротивления $\rho = 1$. Анализ кривых на рис. 2 и 3 показывает, что форма импульса тока ОИЛ отличается от формы идеального прямоугольного импульса, но при увеличении числа ячеек и сохранении значения величины суммарной емкости и индуктивности ОИЛ форма импульса приближается к прямоугольной, а токи индуктивностей практически униполярны.

Исследование кривых также показывает, что фронт и срез импульса имеют конечные длительности, уменьшающиеся с ростом числа ячеек. На плоской части импульса присутствуют осцилляции, причем амплитуда первого выброса с ростом n остается неизменной ($\Delta I \approx 12,3\%$), что объясняется дефектом сходимости рядов (эффект Гиббса).

Параметры ОИЛ определяются заданными значениями R и τ и имеют вид

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

Число ячеек n обычно выбирают на основании требований, предъявляемых к длительности фронта, причем варьирование этого числа позволяет получить значения $C_{я}$ кратными стандартному ряду номиналов конденсаторов. При проектировании генераторов на основе ОИЛ выбор конденсаторов производится в первую очередь, исходя из уровневой рабочих напряжений ОИЛ и рабочих частот генератора. Расчет катушек индуктивностей требует знания действующих значений их токов. Обычно все индуктивности ОИЛ изготавливают одинаковыми, а расчет их параметров ведется по действующему значению тока нагрузки при работе генератора в частотном режиме. Основные параметры импульсов, формируемых ОИЛ в согласованной активной нагрузке, имеют следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} \tau &\approx 2,2n\sqrt{L_{я}C_{я}}; \tau_{фр} \approx 0,61\sqrt{L_{я}C_{я}}; \\ \tau_{ср} &\approx (2,3 + 0,075n)\sqrt{L_{я}C_{я}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tau_{фр}$ и $\tau_{ср}$ — междетильные длительности фронта и среза импульса соответственно.

В тех случаях, когда рабочая частота генератора невелика (не превышает единиц герц), выбор сечения обмоточного провода или шин, из которых изготавливают катушки индуктивности, следует производить с учетом омического сопротивления катушек на постоянном токе — R_L . При этом добротность линии $Q_L = \rho/R_L$ должна быть не менее 15–20, чтобы избежать недопустимого по величине спада плоской части импульса. На рис. 4 приведены токи нагрузки 5-звенной ОИЛ для трех различных значений добротности линии Q_L : ∞ (кривая 1), 25 (кривая 2) и 10 (кривая 3). Из анализа рис. 4 следует, что увеличение потерь в структуре линии приводит к увеличению спада плоской части импульса, увеличению длительностей и самого импульса, и его среза.

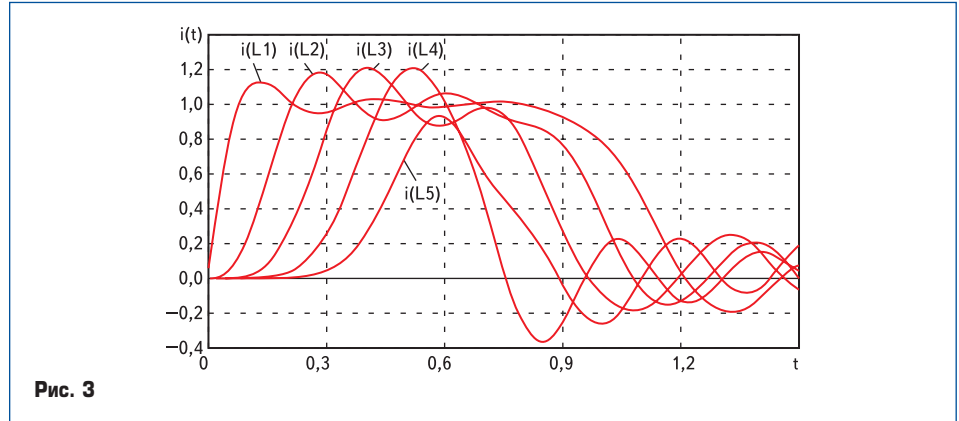


Рис. 3

В силу этого можно записать, что

$$P_{ik} \approx \frac{I_{II}^2 R_L}{Q_k} = \frac{I_{II}^2 R_L}{T} \tau_k = \frac{I_{II}^2 R_L}{T} \tau \frac{n-k+1}{n}.$$

Отсюда

$$\eta = 1 - \frac{2I_{II}^2 R_L \tau}{TC_0 U_{II}^2 f} \sum_{k=1}^n \frac{n-k+1}{n}.$$

Полагая, что режим работы линии согласованный, считаем

$$U_{II}/I_{II} = 2\rho, \tau = 2\sqrt{L_0 C_0}$$

и окончательно получим

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{R_L}{\rho} \sum_{k=1}^n \frac{n-k+1}{n} = \\ &= 1 - \frac{1}{Q_L} \sum_{k=1}^n \frac{n-k+1}{n} = 1 - \frac{1}{Q_L} \times \frac{n+1}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из зависимости (4) видно, что с ростом числа ячеек n при сохранении величины добротности Q_L КПД процесса разряда уменьшается. Отсюда следует вывод, что для сохранения заданной величины спада плоской части импульса ΔI при увеличении числа ячеек n следует пропорционально увеличивать и добротность линии Q_L . На рис. 5 приведены импульсы тока трех нормированных ОИЛ: $n = 5, Q_L = 25$ (кривая 1), $n = 32, Q_L = 25$ (кривая 2) и $n = 32, Q_L = 250$ (кривая 3), что подтверждает данный вывод. В связи с этим необходимо ввести понятие относительной добротности линии $Q_{Л}^*$, то есть величину добротности, отнесенную к одной ячейке. Поскольку величина спада плоской части импульса у 5-звенной ОИЛ с добротностью $Q_L = 25$ обычно находится в допустимых пределах, можно принять $Q_{Л}^* = 5$. Тогда для 10-звенной ОИЛ добротность должна равняться 50 и т. д. Все это не-

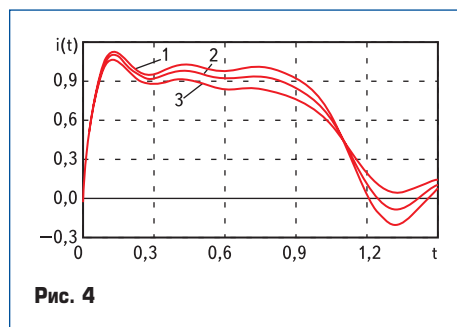


Рис. 4

Оценка допустимой величины спада плоской части импульса ΔI по величине добротности линии $Q_L = \rho/R_L$ дает приемлемый результат только для ОИЛ с малым числом ячеек ($n \leq 5-10$). Дальнейшее увеличение числа ячеек линии n при сохранении длительности импульса τ и величины добротности линии Q_L приводит к существенному увеличению потерь в ней и, соответственно, спаду плоской части импульса ΔI . Более точным критерием для прогнозирования величины ΔI является КПД процесса разряда, который определяет потери в ОИЛ. Примем величину КПД равной

$$\eta = (P_L - P_L)/P_L = 1 - (P_L/P_L),$$

где $P_{II} = \frac{C_0 U_{II}^2}{2} f$ — мощность, отдаваемая емкостными накопителями линии на частоте следования импульсов тока нагрузки f ; $P_L = \sum_{k=1}^n P_{Lk}$ — суммарная мощность потерь в индуктивных элементах, где $1 \leq k \leq n$.

В ДЛРП, эквивалентной ОИЛ и разбитой на n отрезков, токи всех отрезков имеют прямоугольную форму, но разную длительность, а их амплитуды равны друг другу.

Введем понятие скажности импульсов тока k -ой индуктивности

$$Q_k = 1/(f\tau_k) = T/\tau_k.$$

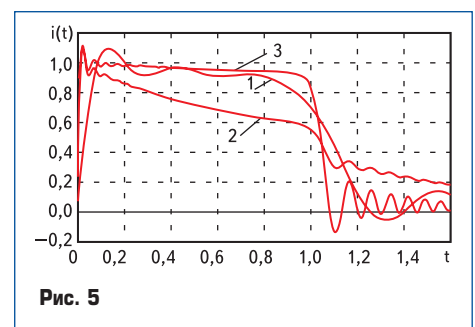


Рис. 5

сколько ограничивает допустимое количество ячеек ОИЛ, так как изготовление линий с очень высокой добротностью затруднительно.

Иная картина возникает в том случае, когда потери в структуре линии определяются как потери в конденсаторах. При этом в первую очередь подразумеваются потери, определяемые омическим сопротивлением обкладок конденсаторов, их выводов и сопротивлением токоведущих шин, подключенных непосредственно к конденсаторам ячеек. Следует отметить, что конденсаторы, используемые в силовой импульсной технике, обладают малыми утечками, и эта составляющая потеря, проявляющаяся в основном только в процессе заряда, обычно не учитывается.

Учет потерь в конденсаторах при их разряде моделируют резисторы, включаемые последовательно с конденсаторами в каждую ячейку. При этом выявляется иной механизм влияния на процесс разряда. На рис. 6 приведены временные зависимости тока нагрузки нормированной 5-звенной линии для трех значений: $R_C = 0$ (кривая 1), $R_C = 0,2\rho$ (кривая 2) и $R_C = 0,5\rho$ (кривая 3). Из этих зависимостей следует, что амплитуда импульса практически не уменьшается, но несколько сглаживаются осцилляции, увеличивается длительность среза импульса и, соответственно, его полная длительность. Отсюда следует, что учет потерь в конденсаторах ОИЛ не представляет практического интереса даже при больших значениях R_C .

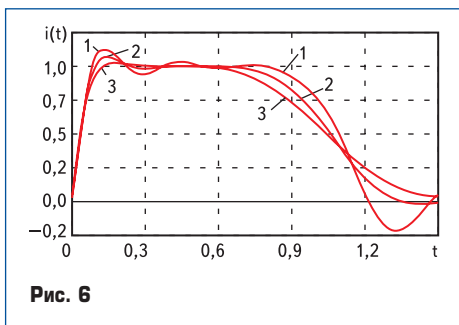


Рис. 6

При реализации генераторов импульсов обычно предъявляются высокие требования к форме импульсов тока нагрузки, особенно к постоянству вершины импульсов. При этом требуется снижение амплитуды осцилляций, достижение приемлемых значений величины спада плоской части при одновременном сохранении требуемой величины длительности фронта. Для уменьшения амплитуды осцилляций на плоской части импульса ОИЛ следует увеличить значение входной индуктивности линии $L_я$, что может быть сделано при подключении дополнительной индуктивности $L_д$. При коррекции осцилляций длительность фронта рассчитывается с учетом $L_д$ и равна

$$\tau_{фр} \approx 0,61(1 + L_д/L_я)\sqrt{L_яC_я}$$

На рис. 7 приведены токи индуктивностей 5-звенной линии для условия $L_д = L_я$. Приведенная на рис. 7 сглаженная кривая тока нагрузки показывает, что введение дополнительной индуктивности $L_д = L_я$ незначительно удлиняет активную длительность среза, кото-

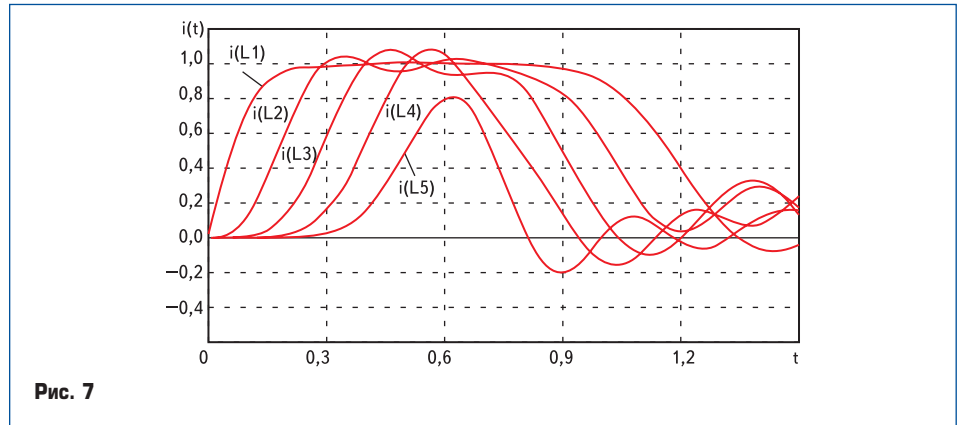


Рис. 7

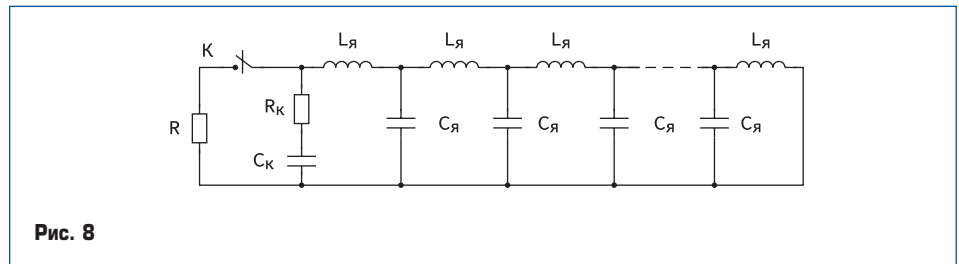


Рис. 8

рую практически можно рассчитывать по (3). Активная длительность сглаженного импульса при этом несколько возрастает и равна.

$$\tau \approx 2,2(n + 0,5)\sqrt{L_яC_я}$$

Так как при введении дополнительной индуктивности $L_д = L_я$ длительность фронта импульса возрастает практически в два раза, для восстановления нужной длительности фронта, соответствующей $L_д = 0$, число звеньев линии следует увеличить вдвое при сохранении суммарных величин индуктивности и емкости линии. Помимо этого уменьшение длительности фронта импульса может быть достигнуто включением параллельно ОИЛ корректирующей емкости $C_к \approx C_я$, соединенной последовательно с корректирующим сопротивлением $R_к = \rho$ (рис. 8). В процессе заряда емкость $C_к$ заряжается вместе с другими конденсаторами линии до напряжения E . После замыкания ключа K напряжение на нагрузке в нулевой момент времени $u_R(0) = 0,5E$. Однако включение корректирующей цепочки $R_к-C_к$ приводит к увеличению длительности среза формируемого импульса и несколько снижает КПД генератора. На рис. 9 кривая 1 соответствует импульсу тока нагрузки нормированной 5-звенной линии, а кривая 2 — той же линии с корректирующей цепью. На рисунке видно, что при работе по этой схеме вершина импульса не корректируется. Отмеченные недостатки в существенной степени устраняются при использовании схемы коррекции, приведенной на рис. 10. Здесь корректирую-

щая емкость $C_{к1}$ заряжается вместе с линией до напряжения E . Последовательно с нагрузкой включается корректирующий RLC -двухполюсник, параметры которого удовлетворяют соотношениям

$$R_{C_к1} = R_кC_{к2}, R_к = \sqrt{L_к/C_{к1}}, \\ 1/C_{к1} = 1/C_{к1} + 1/C_{к2}. \quad (5)$$

Три равенства (5) определяют три из четырех параметров корректирующей цепи. Четвертый параметр может быть выбран произвольно.

Удобно принять $C_{к1} = C_я$, либо $L_к = L_я$. В тех случаях, когда паразитная емкость нагрузки $C_п$ значительно меньше емкости $C_{к1}$, формулы для расчета $R_к$, $C_{к1}$ и $C_{к2}$ упрощаются и могут быть представлены в виде: $R_к = R_п$, $C_{к2} = C_п$, $C_{к1} = L_к/R^2$. На рис. 11 приведен импульс тока 5-звенной ОИЛ, работающей на резистивную нагрузку, шунтированную емкостью, без коррекции (кривая 1) и скорректированный импульс тока этой же линии (кривая 2).

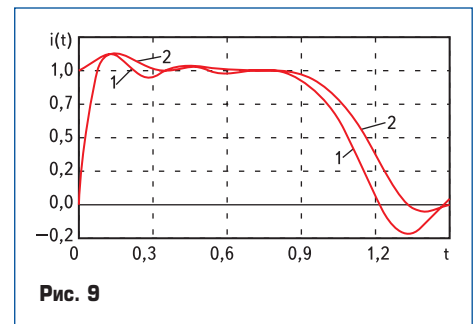


Рис. 9

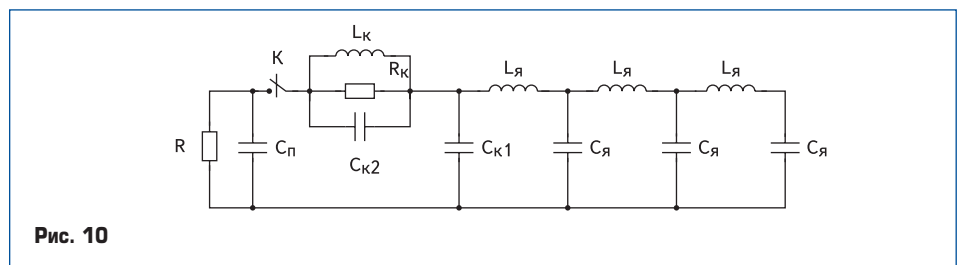


Рис. 10

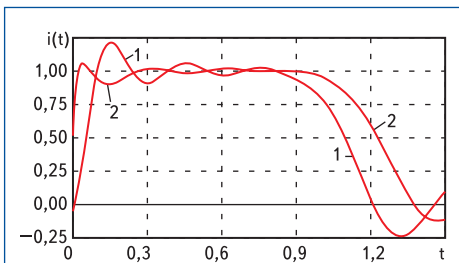


Рис. 11

На рисунке видно, что скорректированный импульс имеет практически нулевую длительность фронта и меньшие осцилляции, но большую длительность.

В реальных условиях генераторы прямоугольных импульсов работают не на идеализированную резистивную нагрузку, а в общем случае на комплексную, параметры которой чаще всего удается определить только опытным путем. Обычно в цепи нагрузки присутствуют последовательно включенная индуктивность, определяемая индуктивностью проводников и нагрузки, и параллельно включенная нагрузка емкость, определяемая как емкостью проводников, так и емкостью конструкции самой нагрузки. Скорее всего, представить комплексную нагрузку генератора в самом общем виде невозможно. Но учитывая то, что в составе генераторов прямоугольных импульсов часто присутствует согласующий импульсный трансформатор, можно считать, что генератор работает на нагрузку, комплексные параметры которой определяются основными параметрами импульсного трансформатора. На рис. 12 приведена схема генератора, в котором ОИЛ ($L_{я}$ — входная индуктивность ОИЛ) нагружена на цепь, состоящую из последовательно включенной индуктивности $L_{д}$, самой нагрузки $R_{н}$ и шунтирующих ее емкости $C_{н}$ и индуктивности $L_{н}$. Исходя из классической схемы замещения импульсного трансформатора, индуктивность $L_{д}$ можно рассматривать как индуктивность рассеяния трансформатора, индуктивность $L_{н}$ как индуктивность намагничивания трансформатора, а емкость $C_{н}$ — как сумму паразитных емкостей трансформатора.

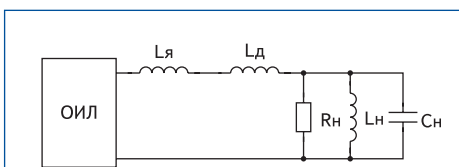


Рис. 12

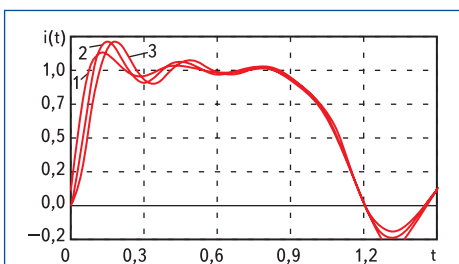


Рис. 13

На рис. 13 приведены временные зависимости токов нагрузки нормированной ОИЛ ($L_{я} = 0,1, C_{я} = 0,1, n = 5$) для условий $L_{д} = 0, L_{н} = \infty, C_{н} = 0, 0,03$ и $0,06$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно). При детальном анализе этих зависимостей обнаруживается, что междельная длительность фронта импульса увеличивается незначительно, длительность среза практически не меняется, а амплитуда выброса при данных соотношениях емкостей ячейки и нагрузки возрастает. На рис. 14 приведены временные зависимости токов нагрузки нормированной ОИЛ при $L_{д} = 0, C_{н} = 0, L_{н} = \infty, 2, 1$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно). На рисунке видно, что шунтирование нагрузки индуктивностью практически не изменяет длительность фронта, но приводит к существенному уменьшению междельной длительности самого импульса и амплитуды выброса.

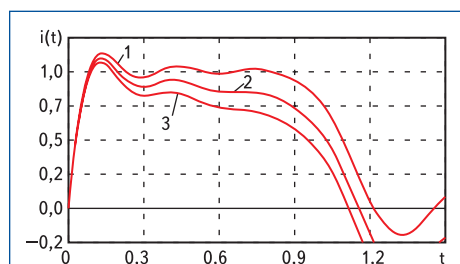


Рис. 14

В тех случаях, когда нагрузка имеет индуктивный характер и может быть представлена в виде последовательной $R_{н}-L_{н}$ цепи, а величина индуктивности нагрузки сопоставима с величиной индуктивности ячейки ОИЛ, входная индуктивность ОИЛ $L_{я}$ может быть уменьшена на величину $L_{н}$.

Следует отметить, что анализ электромагнитных процессов в ОИЛ, работающей на сложную комплексную нагрузку, когда необходимо учитывать влияние всех элементов одновременно, не представляет особой сложности при использовании современных вычислительных программных средств. Но при этом необходимо иметь адекватную модель нагрузки, что иногда вызывает некоторые трудности, поскольку определение параметров этой нагрузки (в первую очередь паразитных) обычно производится экспериментально.

В реальных устройствах нагрузка импульсных генераторов чаще всего нелинейная. Характерными примерами нелинейных нагрузок являются анодные цепи магнетронов, объемный газовый разряд в газовых лазерах, лампы накачки твердотельных лазеров, дуговой разряд в импульсных сварочных установках, контуры нагрузки контактных конденсаторных сварочных машин и т. п. Анализ электромагнитных процессов в импульсных генераторах, работающих на нелинейную нагрузку, требует знания вольт-амперной характеристики (ВАХ) данной нагрузки, которая может быть задана аналитически, графически или табличным способом. Обычно ВАХ нагрузки получают экспериментально, а затем аппроксимируют их аналитическими зависимостями — степенным рядом, тригонометрическими функциями и т. п. Таким образом, задача ана-

лиза электромагнитных процессов в ОИЛ, работающей на произвольную нелинейную резистивную нагрузку, может быть решена численно с достаточно высокой точностью, определяемой в первую очередь адекватностью математической модели нагрузки. При проектировании и изготовлении ОИЛ, работающих на нелинейные нагрузки, возникает задача определения оптимальных параметров элементов ОИЛ. При этом необходимо исходить из того, чтобы режим работы ОИЛ был наиболее близок к согласованному, когда практически вся энергия, запасенная в линии, выделялась в нагрузку за время, равное длительности импульса. Традиционно вопрос о согласовании ОИЛ с линейной нагрузкой рассматривается на примере согласования эквивалентной ДЛРП, а затем результаты переносят на ОИЛ с конечным числом элементов. Этот подход может быть использован и при решении задачи о согласовании ОИЛ с нелинейной нагрузкой при допущении, что нагрузка является резистивной и безынерционной.

Пусть вольт-амперная характеристика нагрузки имеет вид $u_{н} = u(i)$ и однозначна относительно тока. ДЛРП, заряженная до напряжения E и формирующая в нагрузке импульс тока длительностью τ , на отрезке времени $0 \leq t \leq \tau$ может быть заменена источником ЭДС E и эквивалентным активным сопротивлением ρ , равным волновому сопротивлению ДЛРП. Эквивалентная схема процесса разряда представлена на рис. 15. Для этой схемы справедливо следующее уравнение

$$E = i(t)\rho + u(i).$$

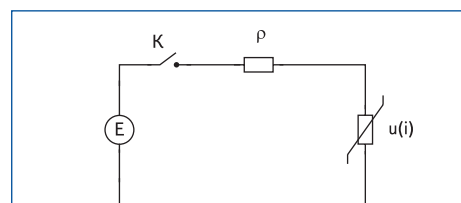


Рис. 15

Так как в этой цепи отсутствуют реактивные элементы, длительность переходных процессов в моменты включения ($t = 0$) и отключения ($t = \tau$) идеального ключа K равна нулю. При этом ток в цепи за время $0 \leq t \leq \tau$ не меняет своей величины: $i(t) = I_{н} = \text{const}$. Величина тока определяется суммарной вольт-амперной характеристикой нагрузки $u(i)$, активного сопротивления ρ и величиной напряжения E . На рис. 16 даны примеры некоторых нелинейных нагрузок.

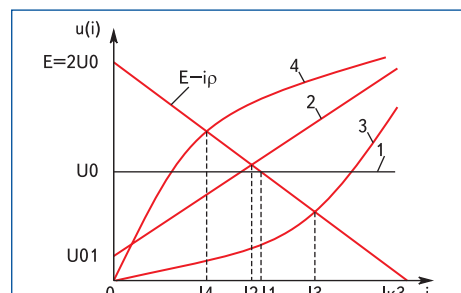


Рис. 16

Прямая 1 соответствует нагрузке в виде про- тивоЭДС U_0 , прямая 2 — нагрузке в виде про- тивоЭДС U_{01} и резистора $R_{диф}$, величина ко- торого определяется углом наклона этой пря- мой, кривые 3 и 4 — нелинейные нагрузки произвольного вида. Прямая $E — i\rho$ пред- ставляет собой падающую внешнюю характе- ристику источника питания с током короткого за- мыкания $I_{кз}/\rho$. Условие согласования в этом случае имеет вид

$$I_H \rho = U(I_H) = E/2. \quad (6)$$

Действительно, энергия, выделившаяся в на- грузке за время длительности импульса W_H , равна энергии $W_{л}$, запасенной в ЛРП:

$$W_H = I_H U(I_H) \tau = \frac{E \sqrt{C_0}}{2 \sqrt{L_0}} \times \times \frac{E}{2} \times 2 \sqrt{L_0 C_0} = \frac{C_0 E^2}{2} = W_{л}.$$

Из (6) следует, что для обеспечения согла- сованного режима работы линии необходимо одновременное выполнение следующих ра- венств:

$$\rho = U(i)/i = R_{ст} \text{ при } I = I_H, \quad (7) \\ E = 2U(i) \text{ при } I = I_H,$$

где $R_{ст}$ — статическое сопротивление нагруз- ки при $I = I_H$.

При проектировании ОИЛ ставится задача определения ее параметров, при которых в на- грузке сформируется прямоугольный импульс тока заданной амплитуды I_H и длительности t . Зная ВАХ нагрузки, можно определить из (7) величину волнового сопротивления ρ и на- пряжение заряда E , при которых будет обес- печен согласованный режим работы. Следует помнить, что на режим согласования при ра- боте на нелинейную нагрузку одновременно влияют как величина волнового сопротивле- ния линии ρ , так и величина напряжения за- ряда E , и согласованный режим исключает воз- можность регулирования тока заряда путем изменения уровня напряжения заряда. В об- щем случае для регулирования амплитуды им- пульса тока нагрузки при сохранении согла- сованного режима работы необходимо одно- временно с изменением напряжения заряда линии изменять и ее волновое сопротивление. Поскольку изготовление и эксплуатация ОИЛ с регулируемым волновым сопротивлением связаны с большими трудностями, наиболее приемлемым способом регулирования тока нагрузки все-таки является регулирование уровня зарядного напряжения. Иногда при этом необходимо предусматривать дополни- тельные схемные решения, обеспечивающие как требуемые параметры импульсов тока на- грузки, так и повышение КПД установки в це- лом [5].

При проектировании мощных ОИЛ необ- ходимо знать величины действующих и ам- плитудных значений токов в элементах и мак- симальных напряжений на них. Максималь- ные значения напряжений не превышают величины зарядного напряжения линии, ко- торое может быть принято за расчетное. Рас-

чет и проектирование катушек индуктивнос- тей необходимо производить по действующим значениям токов этих катушек для максималь- ного режима работы генератора, то есть при максимальных значениях частоты, амплиту- ды и длительности импульсов тока нагрузки. В тех случаях, когда рабочая частота генерато- ра невелика (не превышает единиц герц), вы- бор сечения обмоточного провода или шин, из которых изготавливаются катушки индук- тивности, нужно делать с учетом добротнос- ти линии. Выбор сечения обмоточного прово- да или шин катушек индуктивностей произ- водится по допустимой плотности тока, не превышающей 3–5 ампер на кв. мм в усло- виях естественного режима охлаждения. Поскольку в ОИЛ все катушки индуктивнос- тей имеют один и тот же номинал, их обычно изготавливают одинаковыми. При этом дей- ствующее значение тока каждой индуктивности принимается равным действующему значению тока первой катушки и в отсутствии цепей кор- рекции равно действующему значению тока нагрузки. Тем не менее, приближенно относи- тельную величину действующего значения то- ка k -ой индуктивности $I_{Дк}^*$ ОИЛ с произволь- ным числом ячеек можно определить как

$$I_{Дк}^* = \frac{I_{Дк}}{I_{Д1}} = \sqrt{\frac{n - k + 1}{n}}, \quad (8)$$

где $I_{Дк}$ — действующее значение тока k -ой индуктивности, $I_{Д1}$ — действующее значение тока 1-ой индуктивности, n — число ячеек ли- нии, k — номер индуктивности.

Действующее значение прямоугольного им- пульса тока k -ой индуктивности определяет- ся зависимостью (8), что и позволяет оценить потери в линии.

В таблице 1 приведены величины $I_{Дк}^*$, вы- численные для 3-, 5- и 10-звенных линий по формуле (8) и численным методом.

Таблица 1

№ инд. k	$I_{Дк}^*$ $n = 3$ (8)	$I_{Дк}^*$ $n = 3$ числ.	$I_{Дк}^*$ $n = 5$ (8)	$I_{Дк}^*$ $n = 5$ числ.	$I_{Дк}^*$ $n = 10$ (8)	$I_{Дк}^*$ $n = 10$ числ.
1	1	1	1	1	1	1
2	0,816	0,812	0,894	0,892	0,949	0,947
3	0,577	0,573	0,7745	0,769	0,894	0,892
4			0,632	0,626	0,837	0,834
5			0,447	0,443	0,775	0,772
6					0,707	0,704
7					0,632	0,629
8					0,548	0,543
9					0,447	0,443
10					0,316	0,313

Таблица 2

№ инд. k	$I_{Дк}^*$ $n = 3$	$I_{Дк}^*$ $n = 5$	$I_{Дк}^*$ $n = 10$
1	1,123	1,123	1,123
2	1,178	1,180	1,178
3	1,001	1,205	1,206
4		1,206	1,219
5		0,931	1,228
6			1,234
7			1,238
8			1,239
9			1,184
10			0,816

Из таблицы 1 следует, что простая прибли- женная зависимость (8) дает несколько завы- шенные значения $I_{Дк}^*$, но разница проявляется только в третьем знаке после запятой.

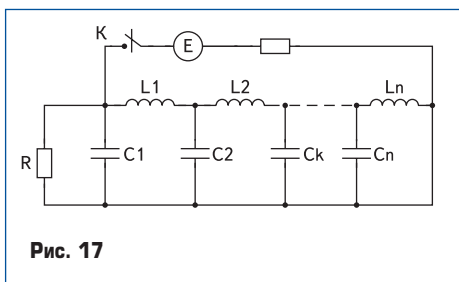
В таблице 2 приведены амплитудные значе- ния токов индуктивных элементов, которые в различных ОИЛ могут на 17,8–23,9% превы- шать расчетную амплитуду импульса тока на- грузки, что следует учитывать при вычисле- нии величин электродинамических сил, про- порциональных квадрату амплитуды тока.

Обычно ОИЛ используется как емкостный накопитель энергии. Но так называемую ко- роткозамкнутую ОИЛ можно использовать и как индуктивный накопитель энергии, ко- гда энергия запасается в магнитном поле кату- шек индуктивностей. В этом случае электро- магнитные процессы в линии подобны про- цессам, возникающим в разомкнутой линии, но роль волн напряжения в разомкнутой ли- нии здесь выполняют волны тока, и наоборот. При $R = \rho$ на нагрузке формируется прямо- угольный импульс напряжения, амплитуда ко- торого равна

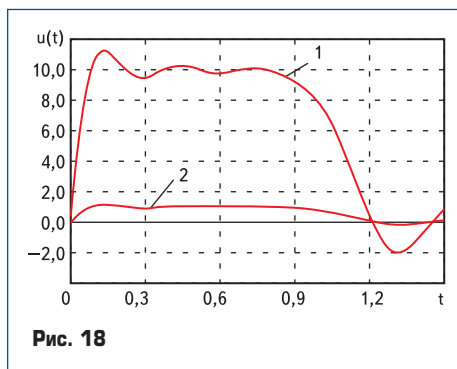
$$U_R = IR/2 = E/2 \times R/R_H.$$

На рис. 17 приведена схема 5-звенной ко- роткозамкнутой ОИЛ, энергия в которой за- пасается в индуктивных элементах, а нагруз- ка подключается параллельно емкости первой ячейки.

Короткозамкнутая формирующая линия имеет то преимущество над разомкнутой ли- нией, что при $R \gg R_H$ она предоставляет воз- можность получить импульс напряжения зна- чительной амплитуды $U_R \gg E$. Однако процесс накопления и хранения энергии в магнитном поле линии сопряжен с рядом недостатков и имеет низкий КПД. Поэтому короткозамк- нутые формирующие линии применяются тог- да, когда отмеченное достоинство является осо-



бенно существенным. Высоковольтный силовой ключ К должен быть полностью управляемым, поскольку он работает на размыкание, что несколько затрудняет практическую реализацию этой схемы. На рис. 18 показаны импульсы напряжения на двух согласованных линейных нагрузках $R = \rho = 1$ Ом и $R = \rho = 10$ Ом. В обоих случаях ток заряда ра-



вен 2 А. Длительность нормированного импульса — 1 с. Амплитуды импульсов напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ составили соответственно 1 и 10 В, токи обеих нагрузок одинаковы и имеют амплитуду 1 А.

Литература

1. Иццоки Я. С., Овчинников Н. И. Импульсные и цифровые устройства. М.: Советское радио, 1972.
2. Левинштейн М. Л. Операционное исчисление и его приложения к задачам электротехники. М.-Л.: Энергия, 1964.
3. Лукин Ф. В. Переходные процессы в линейных элементах радиотехнических устройств. М.: Оборонгиз, 1950.
4. Евтянов С. И., Редькин Г. Е. Импульсные модуляторы с искусственной линией. М.: Советское радио, 1973.
5. Высоковольтный стенд для испытания ограничителей перенапряжений / Коротаяев Н. В., Опре В. М., Саенко И. В. // Свидетельство на полезную модель № 25092. Бюл. № 25, 2002.